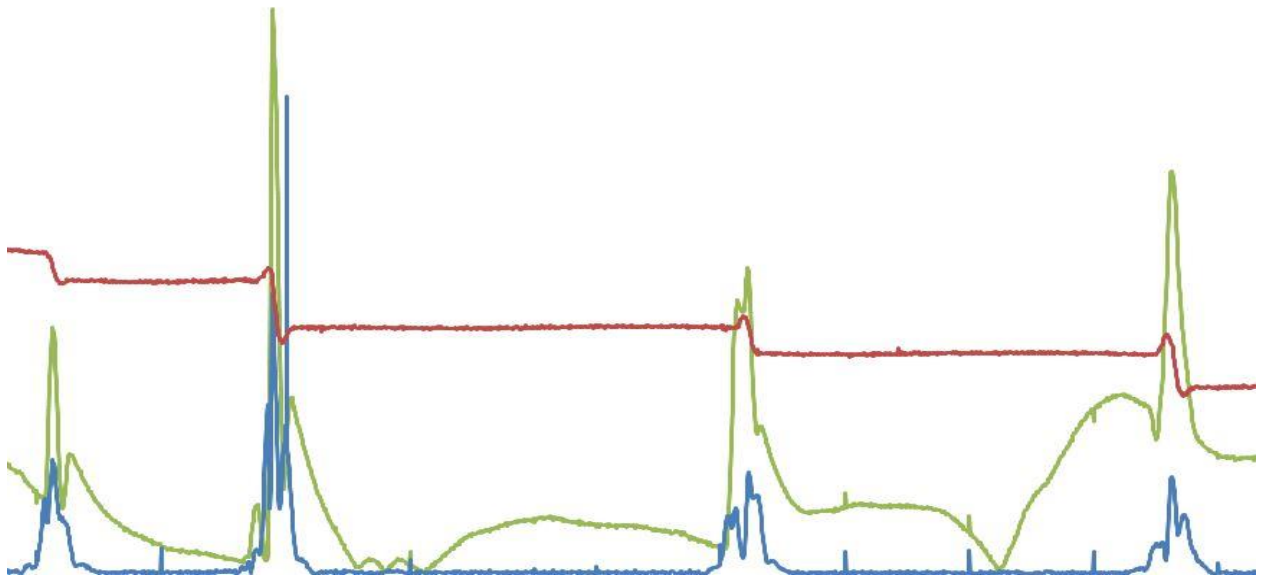


ZÜRCHER HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN
DEPARTMENT LIFE SCIENCES UND FACILITY MANAGEMENT
INSTITUT UNR



Untersuchungen zur Variabilität von Steinschlagflugbahnen

Bachelorarbeit

von

Tobias Sutter

Bachelorstudiengang 2014

Studienrichtung Umweltingenieurwesen

Abgabedatum: 07. September 2017

Fachkorrektoren:

Dr. Merlo, Olivier

ZHAW, Reidbach, Einsiedlerstrasse 31a, 8820 Wädenswil

Dr. Volkwein, Axel

Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Zürcherstrasse 111, 8903 Birmensdorf

Impressum

Autor:	Tobias Sutter Klostermühlestrasse 16 8840 Einsiedeln tobiassu@bluewin.ch
Hochschule:	Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften ZHAW Departement N, Life Sciences and Facility Management Grüntal, Postfach 8820 Wädenswil
Zitiervorschlag:	Sutter, T. (2017). Einschlagcharakteristik natürlicher Steine. <i>Bachelorarbeit</i> . ZHAW, Wädenswil, Departement N, unveröffentlicht.
Keywords:	Steinschlag, Einschlag, Aufprall, Beschleunigung, Trajektorie

Zusammenfassung

Im Alpenland Schweiz gehören Steinschläge, auch wegen ihres häufigen Vorkommens, zu den prägendsten Naturgefahren. Trotz nur sehr lokal vorkommenden Ereignissen können die Auswirkungen auf Mensch, Tiere und Infrastruktur fatal sein. Um die Auswirkungen so gering wie möglich zu halten und um Vorsorgemassnahmen treffen zu können, werden mittels Simulationsprogrammen Steinschläge simuliert. Die Resultate solcher numerischen Modelle sind zwar recht zuverlässig, stimmen jedoch häufig nicht mit der Realität überein. Deshalb ist es wichtig, dass diese Simulationsprogramme mit Erfahrungswerten aus möglichst realitätsnahen Versuchen abgeglichen und kalibriert werden.

Aus diesem Grund wurden im Sommer 2014 im Rahmen dreier Bachelorarbeiten zusammen mit dem Eidgenössischen Forschungsinstitut für Wald, Schnee und Landschaft WSL am Oberalppass bei Tschamut (GR) über 100 künstliche Steinschläge entlang eines Grashanges durchgeführt. Diese wurden von neun verschiedenen Startpunkten mit sechs unterschiedlichen Steinformen ausgelöst. Während diesen Steinschlägen wurden, mittels einer im Stein eingebauten Sonde, diverse Parameter wie zum Beispiel Beschleunigungen oder Position gemessen. In der vorliegenden Arbeit wurden alle Versuche, welche brauchbare Daten generierten, ausgewertet. Dies waren insgesamt 78 Versuche welche mit drei verschiedenen Steinen durchgeführt wurden (Stein 1, Stein 2 und Stein 4). Dabei wurden die Beschleunigungen in diversen Zusammenhängen getestet. Zum Beispiel wie die Datenverteilung der einzelnen Steine aussieht. Sind Ähnlichkeiten vorhanden? Lässt sich ein Muster erkennen? Auch wurde analysiert, ob die Dauer der vorangehenden Flugphase einen Einfluss auf die Beschleunigung eines Einschlages hat oder ob die Dauer eines Einschlages abhängig von der Flugphase ist.

Vergleiche zwischen den horizontalen Reichweiten ergaben, dass der Stein mit der rundesten Form (Stein 1) auch die grössten Reichweiten aufwies, der Stein mit einem abgeplatteten Aussehen (Stein 4) die kürzesten. Dabei hatte der Startpunkt keinen Einfluss. Bei den Vergleichen mit den Beschleunigungen gab es, falls vorhanden, meistens nur Ähnlichkeiten zwischen Stein 1 und Stein 2 welcher ebenfalls eine eher runde Form hatte. Zu Stein 4 waren selten Ähnlichkeiten vorhanden. Klare Muster liessen sich aber nicht erkennen. Auch bei den restlichen oben genannten Fragen waren keinerlei Zusammenhänge sichtbar. Dies bedeutet, dass sich jeder Stein anders verhalten kann.

Diese Resultate gelten allerdings nur für einen Grashang wie jener in Tschamut. Auf steinige oder felsige Hänge sind sie nicht übertragbar. Auch erwähnt werden muss, dass die Bodenbeschaffenheit sowie die Hangneigungen nicht in die Auswertungen miteingeflossen sind. Spannend wäre nun ein

Vergleich zwischen den Resultaten dieser Arbeit und jenen einer Simulation mit der Software RAMMS::ROCKFALL.

Abstract

In countries with a lot of mountains like Switzerland, rockfalls are quite common and therefore one of the most formative hazard. Despite their local appearance the damages it could cause can be disastrous. Because of that humans, animals and infrastructure have to be protected from the worst scenarios. To avoid damages and plan preventive arrangements there are computer programs in use to simulate single rockfalls. In fact, these numerical models provide reliable results but to the reality there is often quite a big deviation. To improve these simulations, it is necessary to calibrate them with empirical values.

For that reason, in summer 2014 within the work of three bachelor theses' and the cooperation of the Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL, over 100 rockfalls along a grass slope near Tschamut (GR) were executed. These were performed from nine different starting points and six different types of stones. During the single falls a sensor, which was inserted in the prepared stones, recorded different parameters like the acceleration and positions. The generated data, from the acceleration during an impact, the time span between the impacts and the duration of the impact itself were used for statistical analysis. Finally, 78 of these rockfalls could be used for this thesis. The remaining rockfalls weren't used because they haven't been recorded with the sensor or the data were too bad. In these 78 experiments only three different stones have been used (Stone 1, Stone 2 and Stone 4). With the data of the acceleration any kind of connections were checked. For example, if there are any relations between the statistical distribution or if the time span between two impacts have an influence on the acceleration of the impact itself.

With the comparisons between the horizontal range of the stones it was found out that the stone with the roundest shape (Stone 1) reached the highest ranges. Stone 4, which had the flattest shape of the three stones, the shortest ones. The starting point itself didn't have an influence. Similarities between the accelerations, if there had been any, were only detected by the comparison of Stone 1 and Stone 2. Comparisons to Stone 4 were almost always negative. A pattern couldn't be found at any of the named questions above. This means that the behaviour of every stone is different.

These results are only applicable on the kind of slopes than the one in Tschamut. Stony or even rocky slopes would be completely different. And also at this research the composition and the steepness of the slope were not considered. It would be interesting to compare the data from this theses and results of the simulation software RAMMS::ROCKFALL.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei meinem Fachkorrektor Dr. Olivier Merlo der ZHAW Wädenswil bedanken, der mir bei jeglichen Fragen zu statistischen Auswertungen geholfen und sich Zeit für eine Vorkorrektur genommen hat. Ein grosses Dankeschön geht an Dr. Axel Volkwein der WSL. Er hat sich bei Fragen aller Arten stets so viel Zeit genommen wie es brauchte, bis ich alles richtig verstanden hatte. Zudem danke ich ihm für die aufgewendete Zeit für die Vorkorrektur. Dazu ermöglichte er mir einen Platz in seinem Büro in Birmensdorf welchen ich jederzeit nutzen konnte. Ebenso möchte ich Barbara und Erich Sutter, sowie Adrian Hochreutener für das Gegenlesen meiner Arbeit danken.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Datenherkunft.....	2
2.1	Grundlagen	2
2.1.1	Grundlagenarbeiten	2
2.2	Versuchshang	2
2.3	Sonde	3
2.4	Versuchssteine.....	3
2.5	Filter.....	5
2.5.1	Fast-Fourier-Transformation.....	6
2.5.2	Butterworth-Filter.....	6
3	Methoden	7
3.1	Definition Einschlag.....	7
3.2	Definition Beschleunigung.....	7
3.3	Definition Einschlagdauer.....	8
3.4	Ermittlung Einschlagdauer	9
3.5	Automatisierung	12
3.6	Schwierigkeiten und Unsicherheiten.....	13
3.6.1	Einarbeitung.....	13
3.6.2	Doppeleinschläge.....	14
3.7	Statistische Tests	15
3.7.1	Shapiro-Wilk-Test.....	15
3.7.2	Kolmogorov-Smirnov-Test.....	15
3.7.3	Kruskal-Wallis-Test	15
3.7.4	Pairwise-Wilcox-Test.....	16

4	Resultate.....	17
4.1	Horizontale Reichweite der Steine.....	17
4.2	Beschleunigungen.....	24
4.2.1	Ausreisser	25
4.2.2	Gefiltert und ungefiltert	26
4.2.3	Normalverteilungen	31
4.2.4	Ähnlichkeiten der Beschleunigungsverteilung der einzelnen Steine	35
4.2.5	Vergleich der Daten zwischen den einzelnen Steinen	37
4.2.6	Vergleich der Beschleunigungen der einzelnen Steine.....	39
4.2.7	Einfluss der Flugzeit auf die Beschleunigung	40
4.2.8	Einfluss der Dauer des Einschlages auf die Beschleunigung	44
4.3	Einfluss der vorgegangenen Flugphase auf die Dauer des Einschlages	49
4.4	Besonderheiten	51
4.4.1	Doppeleinschlag.....	51
4.4.2	Buschkontakt	52
4.4.3	Rollphasen	53
5	Diskussion.....	54
5.1	Horizontale Reichweite der Steine.....	54
5.2	Beschleunigungen.....	54
5.2.1	Ausreisser	55
5.2.2	Gefiltert und ungefiltert	55
5.2.3	Normalverteilungen	55
5.2.4	Ähnlichkeiten der Beschleunigungsverteilung der einzelnen Steine	55
5.2.5	Vergleich der Daten zwischen den einzelnen Steinen	56
5.2.6	Vergleich der Beschleunigungen der einzelnen Steine.....	57
5.2.7	Einfluss der Flugzeit auf die Beschleunigung	57

5.2.8	Einfluss der Dauer des Einschlages auf die Beschleunigung	58
5.3	Einfluss der Flugzeit auf die Dauer des Einschlages	58
5.4	Besonderheiten	59
5.4.1	Doppeleinschlag.....	59
5.4.2	Buschkontakt	59
5.4.3	Rollphasen	59
6	Schlussfolgerungen mit Ausblick	60
7	Literaturverzeichnis	61
	Verzeichnisse	63
	Anhang	68

1 Einleitung

Steinschläge sind aufgrund der Alpen in der Schweiz keine Seltenheit. Die Sturzmassen welche mit Geschwindigkeiten von über 100km/h ins Tal stürzen können, kommen zwar nur lokal vor, können aber, auch wenn nur von geringer Grösse, verheerende Folgen für Menschen, Tiere und Infrastrukturen haben (PLANAT, 2017a). Bei stürzenden Steinmassen mit einem Volumen von über 100 m³, welche Felsstürze genannt werden, können meistens entsprechende Notmassnahmen eingeleitet werden, da sie sich oft über Tage oder gar Wochen im Voraus ankünden. Plötzlich auftretende, stürzende Massen mit einem Volumen von weniger als 100 m³ werden als Steinschlag definiert und lassen keine Zeit für Evakuationen zu (PLANAT, 2017b). Darum wurden in der Vergangenheit genau aus diesem Grund Steinschlag gefährdete Gebiete gemieden. Heutzutage wird, auch aufgrund der stetig wachsenden Bevölkerung, in diesen Gebieten trotzdem gebaut (PLANAT, 2017c). Um diese Menschen, Tiere und Infrastrukturen zu schützen stehen technischen, biologische und raumplanerische Massnahmen zur Verfügung. Damit das Risiko verringert werden kann und die passenden Massnahmen ergriffen werden können, werden Steinschläge mit Simulationsprogrammen, wie zum Beispiel das *RAMMS::ROCKFALL (Rapid Mass Movement Simulation)*, simuliert (PLANAT, 2017d).

In diesem Zusammenhang hat die Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald Schnee und Landschaft WSL, in Begleitung von drei Bachelorarbeiten der Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften ZHAW (Brügger, 2014; Gees, 2014; Lardon, 2014), im Jahr 2014 bei Tschamut GR am Oberalppass über 100 Steinschläge kontrolliert ausgelöst. Dies indem, mit Sonden ausgestattete, Steine einem Grashang entlang hinuntergestossen wurden. Mit den eingesetzten Sonden wurden bei den einzelnen Steinschlagflugbahnen (Trajektorien) unter anderem die Beschleunigung während den Einschlügen, sowie die Rotationsgeschwindigkeit der Steine gemessen.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Vielfalt der einzelnen Sprünge möglichst allgemein in einem stochastischen Modell zu formulieren. Mit Hilfe des Modells können dann Steinschlagsimulationen verbessert und analysiert werden. Hierfür werden die Beschleunigungen während den Einschlügen sowie die vorhergehenden Flugphasen, mit den Programmen Microsoft Excel 2016 und RStudio Version 1.0.143 (RStudio, Inc., 2016) ausgewertet und miteinander verglichen.

2 Datenherkunft

2.1 Grundlagen

Vom 23. bis 27. Juni 2014 wurden von der WSL am Oberalppass Steinschlagversuche durchgeführt, welche von drei Bachelorarbeiten von Umweltingenieur-Studenten der ZHAW Wädenswil (in Absatz 2.1.1 aufgelistet) begleitet wurden. Die dabei gesammelten Daten wurden während eines Praktikums im Dezember 2015 ein erstes Mal bearbeitet und gefiltert. Im Herbstsemester 2016 wurden vom Autor dieser Bachelorarbeit, im Rahmen einer Semesterarbeit, bereits erste Auswertungen vorgenommen. Die Auswertung von zehn der insgesamt 111 Versuchen fungierte zusätzlich auch als Machbarkeitsstudie, um zu eruieren, ob diese Technik auch im grösseren Stil anwendbar ist. So wurden die zehn Versuche aus der Semesterarbeit auf 78 Versuche in dieser Bachelorarbeit ausgeweitet.

2.1.1 Grundlagenarbeiten

Diese Arbeit basiert auf folgenden Arbeiten, welche bereits zu diesen Steinschlagversuchen, verfasst worden sind.

Bachelorarbeiten von 2014 (unveröffentlicht):

Brügger Lucas: Erfassung und Auswertung von Steinschlagflugbahnen im Gelände

Gees Fabio: Erfassung und Auswertung von Steinschlagflugbahnen mittels Video

Lardon Jessica: Vergleich von Steinschlagsimulationen mit den entsprechenden Feldversuchen

Praktikumsbericht von 2015 (unveröffentlicht):

Kummer Peter Synchronisieren der Tschamut Daten

Semesterarbeit von 2017 (unveröffentlicht):

Sutter Tobias Einschlagcharakteristik natürlicher Steine

2.2 Versuchshang

Der Versuchshang befand sich nahe bei Tschamut GR am Oberalppass. Dabei handelte es sich um einen Grashang, welcher zu Beginn steil abfällt und am unteren Ende flach ausläuft (Abbildung 1). Das obere Ende des Hanges wurde von einer ca. 1.5-2.5 m hohen Steinmauer, welche die Passstrasse stützt, begrenzt. Die Steine wurden vom Rand der Mauer hinuntergestossen und rollten dann den Hang hinunter.



Abbildung 1: Hangsituation bei der Rekognoszierung im Mai 2014 (Quelle: Brügger, 2014).

2.3 Sonde

Um die Drehraten, Beschleunigungen und die Position zu messen wurden zwei Messsonden des Typs XSOE der Firma Solcon Systemtechnik GmbH aus Lübeck (D) verwendet. Diese beiden Sonden kamen abwechselungsweise zum Einsatz (Brügger, 2014). Die Positionsdaten wurden in dieser Arbeit allerdings nicht verwendet.

Genauere Darlegungen zu den Themen Versuchshang, Sonde und Positionsbestimmung sind in Sutter (2017) zu finden.

2.4 Versuchssteine

Während den Versuchstagen wurden insgesamt 111-mal Steine von 9 unterschiedlichen Startpunkten losgelassen (Gees, 2014). Es liegen allerdings nur Messungen von 7 Startpunkten vor. Zum Einsatz kamen sechs unterschiedliche Steine. Stein 3 und Stein 5 waren allerdings zu schmal, um Messsonden einbauen zu können und Stein 6 war ein betonierter Normstein (Brügger, 2014). Aus diesen Gründen wurden in dieser Arbeit nur die Versuche der Steine Nr. 1, 2 und 4 ausgewertet. Eine genauere Übersicht dieser Steine findet sich in Tabelle 1.

81 dieser 111 durchgeführten Versuche wurden mit diesen drei Steinen durchgeführt. Davon waren von drei Versuchen die Daten unlesbar, so dass sie weggelassen werden mussten. Insgesamt konnten 78 Versuche für die Auswertung verwendet werden.

Tabelle 1: Übersicht der Versuchssteine Nr. 1, 2 und 4.

Stein Nr.	Masse [kg]	Grösse [cm]	Material	Anzahl Versuche
1	68.7	37 x 32 x 37	Gneis	26
2	78.7	50 x 30 x 39	Kalk	27
4	40.3	46 x 30 x 20	Gneis	25

Wie auf Abbildung 2 gut erkennbar ist, hatte Stein 1 eine beinah runde Form. Ebenso eine ziemlich runde Form wies Stein 2 auf. Einzig Stein 4 hatte ein abgeplattetes Aussehen.



Abbildung 2: Links: Stein 1; Mitte: Stein 2; Rechts: Stein 4 (Quelle: Volkwein, A. (WSL)).

2.5 Filter

Bei den Beschleunigungsdaten waren regelmässige Störamplituden vorhanden, welche zu gross waren um sie ignorieren zu können. Es wird vermutet, dass diese Störungen von den WLAN-Signalen kamen, welche etwa im selben Zeitabstand gesendet wurden, wie die Störamplituden auftreten. Die WLAN-Signale gingen von der Positionssonde an das, für die Positionsbestimmung aufgebaute, LPS-System. Um diese Störamplituden zu minimieren wurden die Daten der Beschleunigungssonden gefiltert. Dies geschah mit einem Butterworth-Filter, der mit einer vorgelagerten Fast-Fourier-Transformation kombiniert wurde. Das Filtern der Daten wurden im Vorfeld dieser Arbeit von Kummer (2015) mittels Matlab bereits durchgeführt. Dabei wurden die Frequenzen der Beschleunigungsdaten zwischen 10-25Hz herausgefiltert. Die Daten der Rotationssonde mussten nicht gefiltert werden, da diese auch ohne Filterung gut lesbar waren. Die Auswirkungen des Filterns der Beschleunigungen sind auf Abbildung 3 sehr gut ersichtlich.

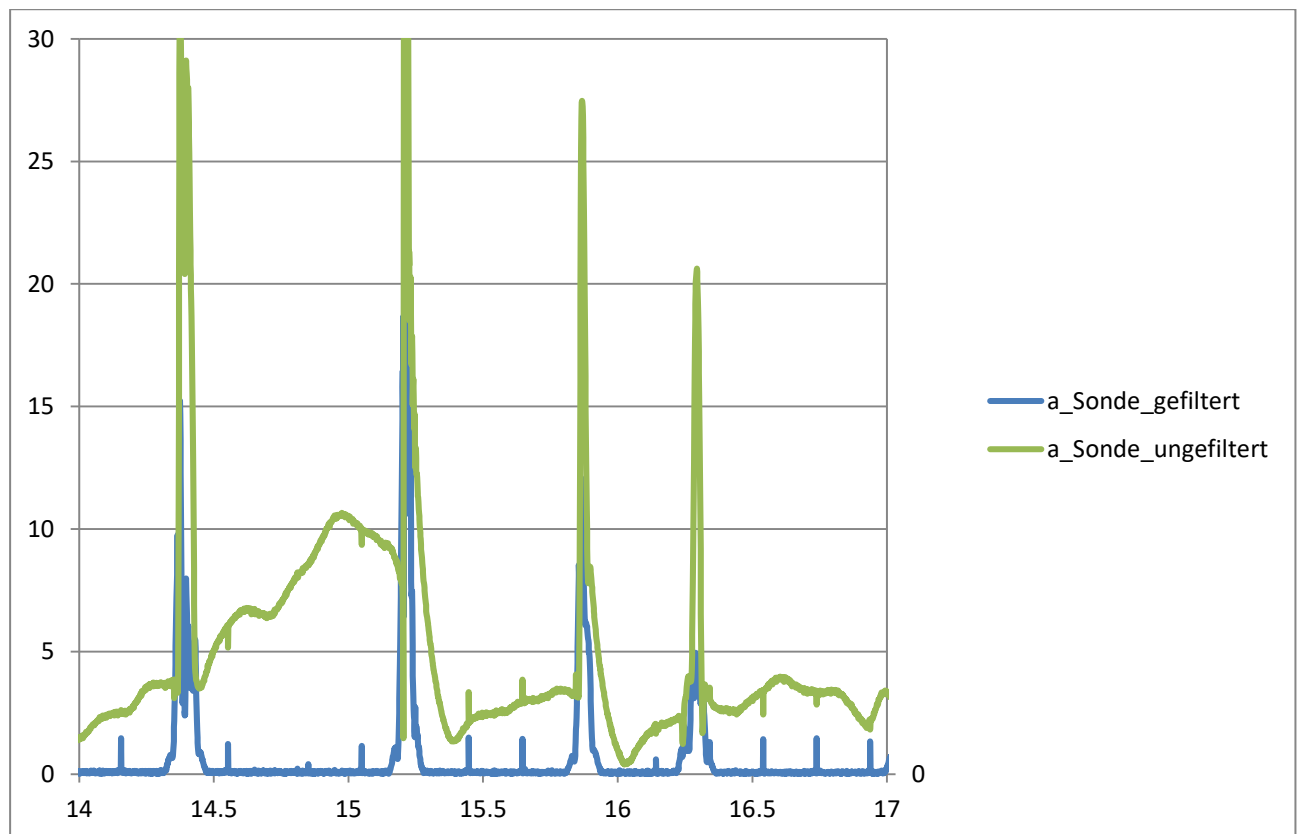


Abbildung 3: Vergleich der gefilterten und ungefilterten Daten der Sonde 1.

2.5.1 Fast-Fourier-Transformation

Mit der Fast-Fourier-Transformation (FFT), beschrieben von Joseph Fourier im Jahre 1822, können kontinuierliche und aperiodische Signale in Frequenzanteile zerlegt und anschliessend einzeln analysiert werden (Haykin & Van Veen, 1999) (Abbildung 4). Bei dieser Analyse stellte sich heraus, dass die oben beschriebenen Störampplituden, im Bereich von 10-25 Hz lagen. Deshalb wurde anschliessend mit dem Butterworth-Filter diesen Messbereich herausgefiltert.

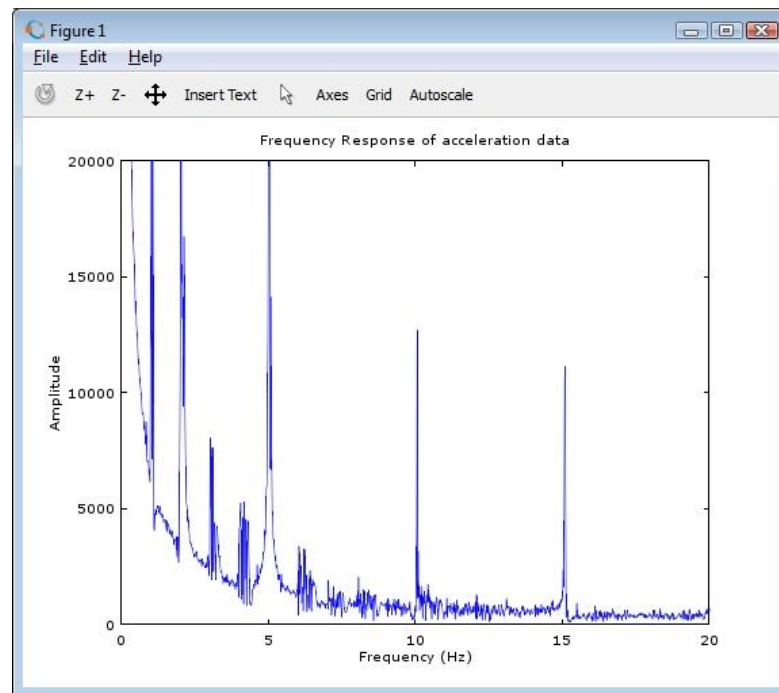


Abbildung 4: Beispielergebnis einer Fast-Fourier-Transformation (Quelle: Zur Verfügung gestellt von Volkwein, A. (WSL)).

2.5.2 Butterworth-Filter

Der Butterworth-Filter ist ein Frequenzfilter und wurde 1930 von Stephen Butterworth beschrieben. Dieser wird durch konstantes Dämpfungsverhalten im Durchlassbereich charakterisiert, in welchem das Dämpfungsverhalten keine Welligkeit hat (Butterworth, 1930). Deshalb gilt der Butterworth-Filter auch als der Filter mit den maximal ebenen Dämpfungsverhalten (Burrus, 2012). In diesem Falle wurde der Messbereich von 10-25 Hz herausgefiltert. Dies war jedoch auch mit einem gewissen Risiko verbunden, da es durchaus auch Einschläge in diesem Messbereich gegeben haben könnte, welche damit herausgefiltert worden wären. Um einen solchen Fall zu verhindern wurden bei der Auswertung im Zweifelsfalle die ungefilterten Daten hinzugezogen.

3 Methoden

Die Ermittlung und Berechnung der Beschleunigungen, Einschlagdauer und Flugphasen wurden mit Microsoft Excel 2016 durchgeführt.

3.1 Definition Einschlag

Als Einschlag wird in dieser Arbeit der Zeitraum eines einzelnen Aufpralles, von der ersten Bodenberührung bis zum Wiederabheben des Steines, bezeichnet.

3.2 Definition Beschleunigung

Wenn in dieser Arbeit von Beschleunigung geschrieben wird, ist damit die Beschleunigung gemeint welche ein Stein während des Einschlages erfährt. Oder anders gesagt, die Kraft welche auf den Stein in dieser Phase wirkt. Sie wird immer in der Masseinheit g ($1\text{ g} = 9.81\text{ m/s}^2$) angegeben.

3.3 Definition Einschlagdauer

Es wurde festgelegt, dass ein einzelner Einschlag beginnt, sobald die Beschleunigungskurve abrupt höher ansteigt und das regelmässige Muster der Flugphase verlässt. Dazu muss auch die Kurve der Rotationssonde eine Veränderung der Umdrehungsgeschwindigkeit anzeigen, da sich diese bei einem Einschlag unweigerlich verändert. Das Ende des Einschlages wurde an jenem Punkt festgelegt, an welchem das Signal des Beschleunigungssensors wieder in das Muster der Flugphase zurückfällt. Die Dauer wurde nur über die Daten der Beschleunigung definiert. Die Umdrehungsgeschwindigkeit diente dabei als Zeiger eines Einschlages. In Abbildung 5 wird die Definition grafisch erklärt.

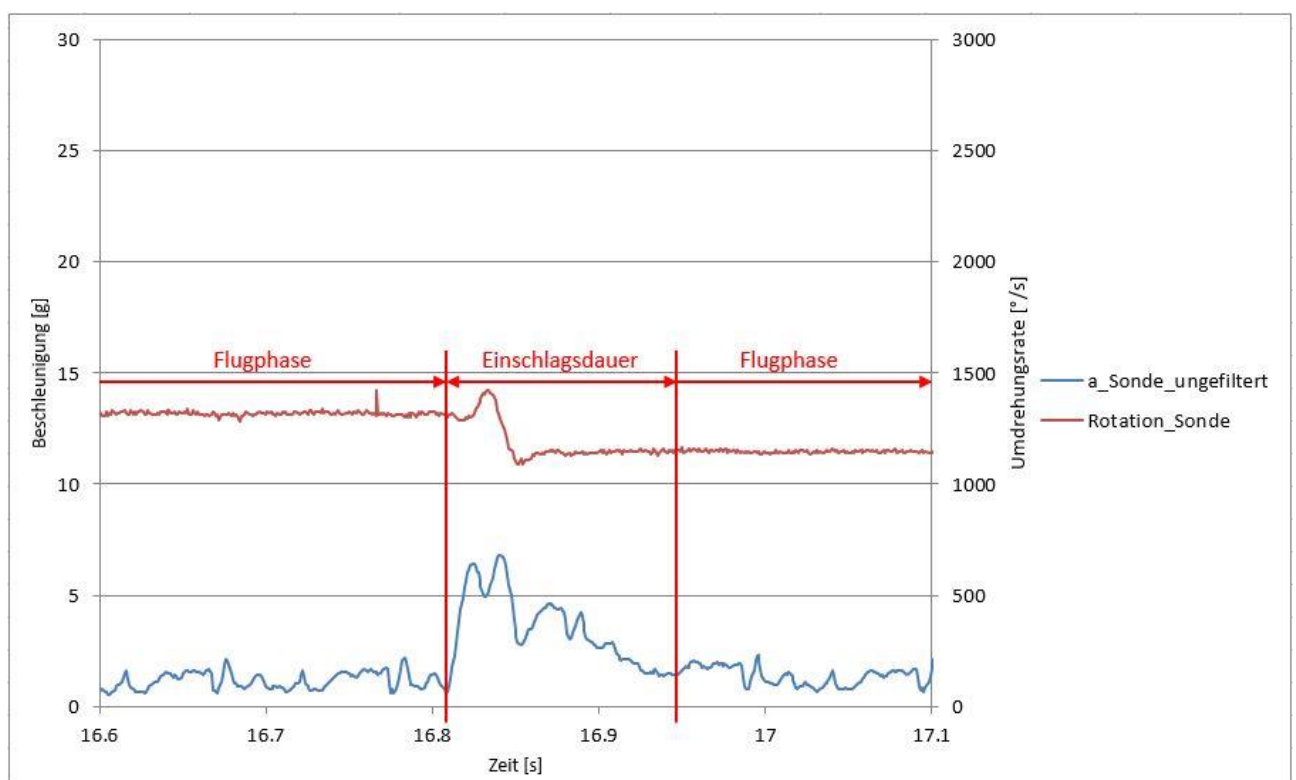


Abbildung 5: Definition der Einschlagdauer eines einzelnen Einschlages.

3.4 Ermittlung Einschlagdauer

Für die Ermittlung der Einschlagsdauer wurde als erstes in Microsoft Excel 2016 ein Diagramm erstellt, welches die Beschleunigung über die Zeit aufzeigt. Auf der horizontalen Sekundärachse wurde die Umdrehungsrate hinzugefügt. Damit die Sonde auch bestimmt von Beginn an misst, wurde der Versuch erst ein paar Sekunden nach Messbeginn gestartet. Da die Steine zuerst noch zur Kante der Mauer gerollt werden mussten, bevor sie hinuntergestossen werden konnten, galt es zu eruieren, ab wann die Steine effektiv losgelassen wurden. Dazu wurden die Daten der Rotationssonde benötigt, da während des an-die-Mauerkante-Rollens die Messungen der Beschleunigungsdaten noch keinen Aufschluss darüber gaben, was gerade ablief. Dieses an-die-Mauerkante-Rollen war im Diagramm gut als Wellenbewegung in den Rotationsdaten sichtbar. Die erste Flugphase eines Steines, von der Mauer herunter, begann zu dem Zeitpunkt, an dem die Rotationsdaten zum ersten Mal nach dem Anrollen konstant auf einem Niveau blieben. Sprich, im Diagramm ab dem Zeitpunkt, ab welchem die Rotationsdaten eine ungefähre Gerade bilden. Im Beispiel auf Abbildung 6 beginnt das Rollen nach 3.996 s und die Flugphase nach 5.087 s. Das Bestimmen der genauen Zeit wird in Abbildung 7 veranschaulicht.

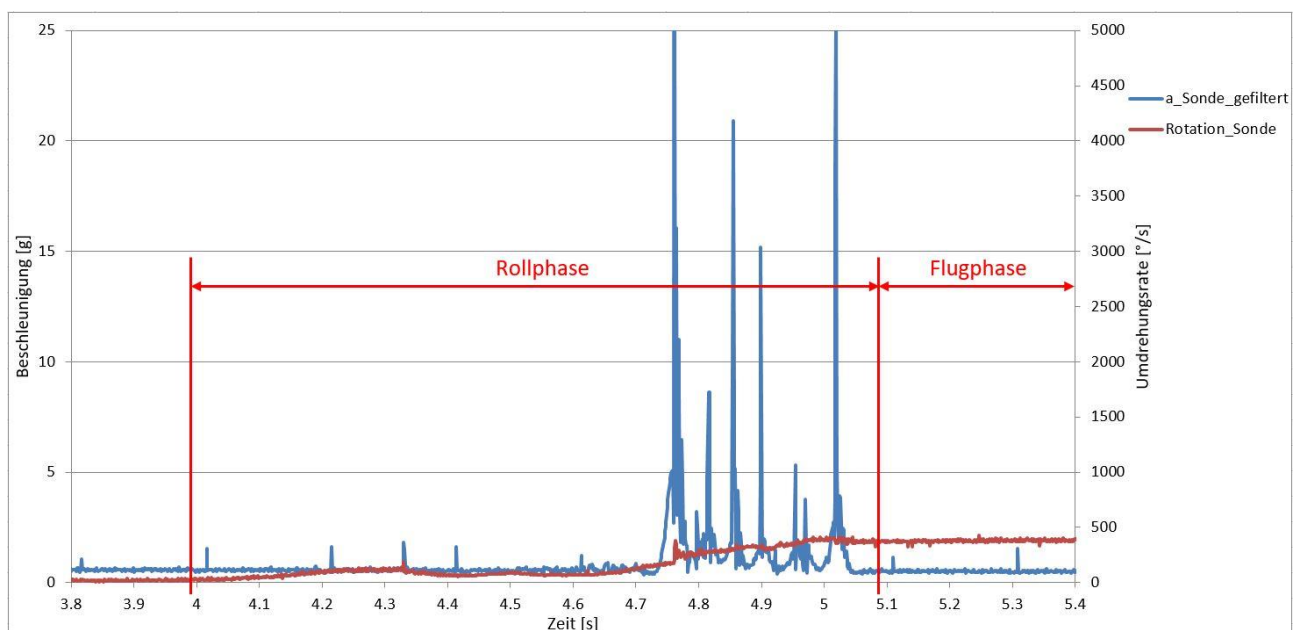


Abbildung 6: Beispiel für die an-die-Mauerkante-Rollen Phase mit anschliessender erster Flugphase.

Die Ermittlung der Einschlagdauer erfolgte visuell. Dabei wurde mit dem Mauszeiger der vermutete Start- bzw. Endpunkt auf den Daten der Beschleunigungssonde anvisiert und die Zeit dann in einer Tabelle notiert. Der Einschlag in Abbildung 7 dauerte zum Beispiel von 15.370 s bis 15.504 s nach Messbeginn dieses Versuches.

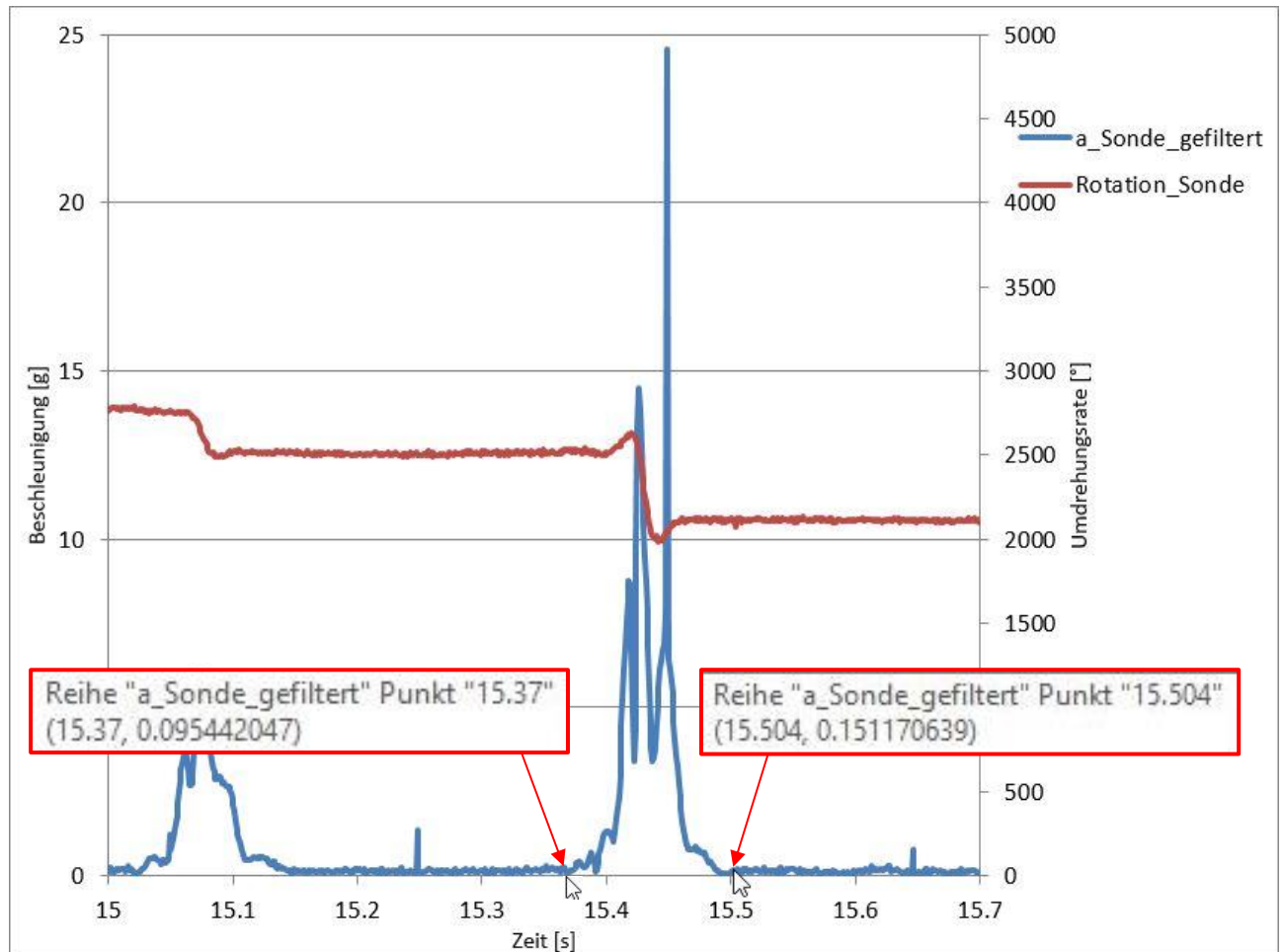


Abbildung 7: Visuelle Ermittlung der Dauer eines Einschlages.

Nach Möglichkeit wurde versucht, immer einen gleich grossen Zeitbereich auf einmal zu betrachten und damit eine möglichst einheitliche Skalierung zu haben. Teilweise lagen die Datenpunkte so nahe beisammen, dass die Skalierung vergrössert werden musste, damit eine möglichst genaue Bestimmung der Einschläge vorgenommen werden konnte. Bei einer zu grossen Vergrösserung bestand allerdings das Risiko den Überblick über das Gesamte zu verlieren.

Auch das Ausrollen musste separat erfasst werden, da diese Phase ebenfalls nichts mehr mit den für diese Arbeit interessanten Einschlägen zu tun hatte. Die Phase des Ausrollens war gut an den nun wieder inkonstanten Daten der Rotationssonde, wie beim Anrollen, erkennbar. Den Anfang des Ausrollens markiert das Ende des letzten Einschlages und es dauerte solange, bis die Kurve der

Umdrehungsrate gegen null zu liegen kam. Auf Abbildung 8 begann die Rollphase bei einer Zeit von 19.891 s und schlussendlich kam der Stein nach 21.684 s zum Stillstand.

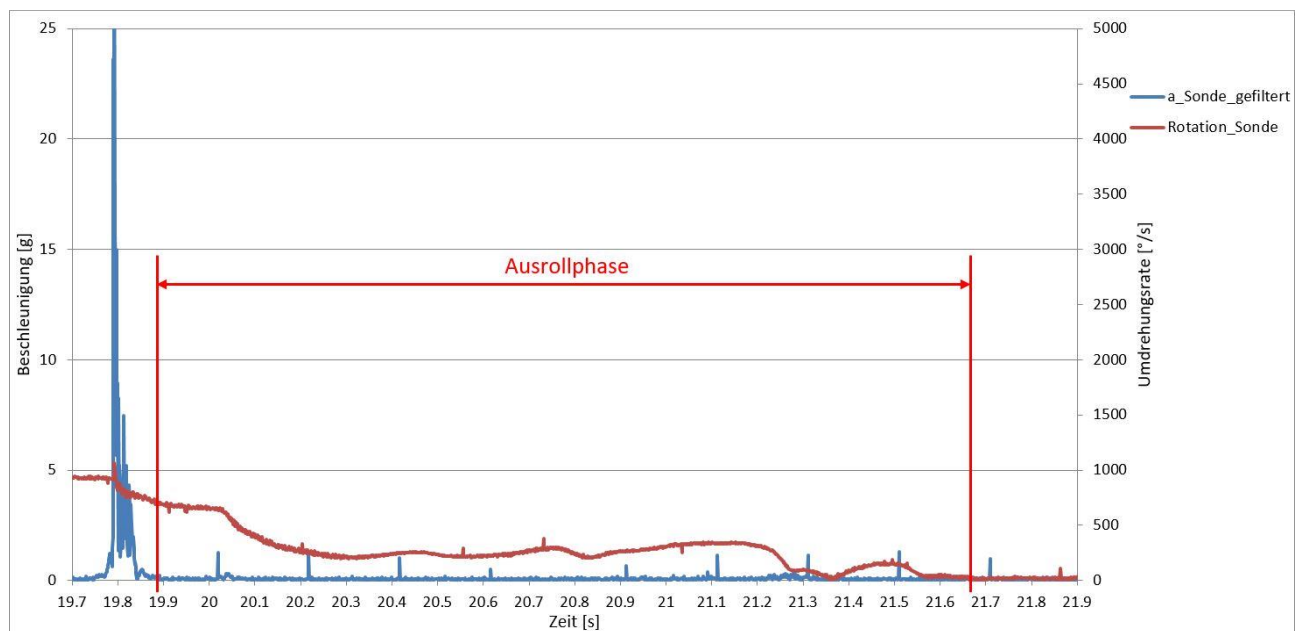


Abbildung 8: Start und Ende einer Ausrollphase.

Die Methode der visuellen Auswertung hat allerdings einen grossen Nachteil. Und zwar ist nicht klar definiert, zu welchem Zeitpunkt der Einschlag genau begann und wann der Stein wieder vom Boden aufgesprungen war. Für einen anderen Bearbeiter sind diese Punkte, ohne die zugehörigen Zahlen, nicht mehr auffindbar. Dadurch wird das Resultat von einer gewissen Willkür durch die auswertende Person beeinflusst. Da bei dieser Arbeit die gesamte Auswertung von nur einer Person durchgeführt wurde, wird davon ausgegangen, dass die Einschätzung der Einschlagdauer immer gleich ausgefallen ist und der somit entstandene systematische Fehler ignoriert werden kann.

Bei den Versuchen im Juni 2014 sind zwei Sonden desselben Typs (Solcon XSOE V2.0) abwechselungsweise eingesetzt worden (Brügger 2014). Dennoch gab es Unterschiede in der Lesbarkeit der Daten. Vor allem nach dem Filtern. Die gefilterten Daten der Sonde 1 waren sehr gut lesbar und konnten gebraucht werden. Die Daten der Sonde 2 waren nach dem Filtern allerdings schlechter zu lesen als vor dem Filtern. Aus diesem Grund wurden bei den Versuchen, welche mit der Sonde 1 gemessen wurden, die gefilterten Daten verwendet und für jene, welche mit der Sonde 2 durchgeführt wurden, die ungefilterten. Zur Kontrolle wurde ein Versuch der Sonde 2 mit den gefilterten und ungefilterten Daten ausgewertet. Die dabei festgestellten Abweichungen der Zeiten lagen im Bereich von Millisekunden, weshalb entschieden wurde, dass dieser Umstand vernachlässigt werden konnte.

3.5 Automatisierung

Um die Willkür bei der Einschlagdauerdefinition zu vermeiden, wäre eine automatisierte Bestimmung nötig gewesen. Eine Zeitreihenanalyse mit Korrelation im Programm RStudio, sowie mit in Microsoft Excel 2016 berechneten Änderungsraten von Beschleunigung und Rotation (Ableitung nach der Zeit) über einen bestimmten Zeitraum, sollten diese Automatisierung bringen. In Tabelle 2 werden die frei wählbaren Kalibrierwerte aufgeführt. Mit dem "Level Beschleunigung Kontakt" konnte festgelegt werden, wie hoch die Beschleunigung für einen Einschlag mindestens sein muss. Da bei jedem Einschlag auch die Daten Rotationsgeschwindigkeit ausschlugen, wurde mit dem "Level Drehgeschwindigkeit Kontakt" definiert, wie hoch die Änderungsrate der Rotation sein muss, um als Einschlag gewertet zu werden. Dasselbe gilt für die Kalibrierwerte für die "Luft" bei der Definition einer Flugphase. Mit der Intervallgrösse wurde festgelegt über wie viele einzelne Messungen die Änderungsraten berechnet werden sollten. In der "Startzeile Trajektorie" wurde eingegeben, ab welcher Zeile im Datenfile die Ermittlung beginnen soll. Diese liegt nicht bei null, da der Stein zu Beginn der Messungen noch zur Kante der Mauer gerollt werden musste.

Tabelle 2: Auflistung der wählbaren Kalibrierwerte mit Beispielswerten, beim Versuch der Automatisierung mit Microsoft Excel 2016.

Kalibrierwerte	gewählt
Level Beschleunigung Kontakt	1.763
Level Drehgeschwindigkeit Kontakt	2
Level Beschleunigung Luft	0.768
Level Drehgeschwindigkeit Luft	2
Intervallgrösse Ableitung	8
Startzeile Trajektorie	4620

Trotz etlichen Anpassungen der Kalibrierwerte konnten innert nützlicher Frist keine zufriedenstellenden Resultate erreicht werden. Deshalb erfolgte die gesamte Auswertung nach der in Kapitel 3.4 beschriebenen Methode.

3.6 Schwierigkeiten und Unsicherheiten

3.6.1 Einarbeitung

Bei den Daten, welche für die Machbarkeitsstudie (Sutter, 2017) bereitgestellt wurden, waren die Start- und Endzeitpunkte nach der gleichen Methode wie in dieser Arbeit bereits bestimmt. Deshalb musste für das Bestimmen der Einschläge zuerst eine gewisse Routine erarbeitet werden. Bei der Auswertung eines Versuches, welcher bereits in Sutter (2017) bearbeitet, aber die Start- und Endzeitpunkte von Kummer (2015) bestimmt wurden, wurde die unterschiedliche Interpretation von Start- und Endzeitpunkt, von unterschiedlichen auswertenden Personen, sehr gut sichtbar. So gab es bei der Einschlagsdauer Abweichungen von bis zu 0.2 s. Ebenso kam vor, dass unterschiedlich viele Einschläge definiert wurden. Zum Beispiel hat Kummer (2015) bei Versuch 009 insgesamt 24 Einschläge definiert. Der Autor dieser Arbeit kam beim selben Versuch auf 27 Einschläge.

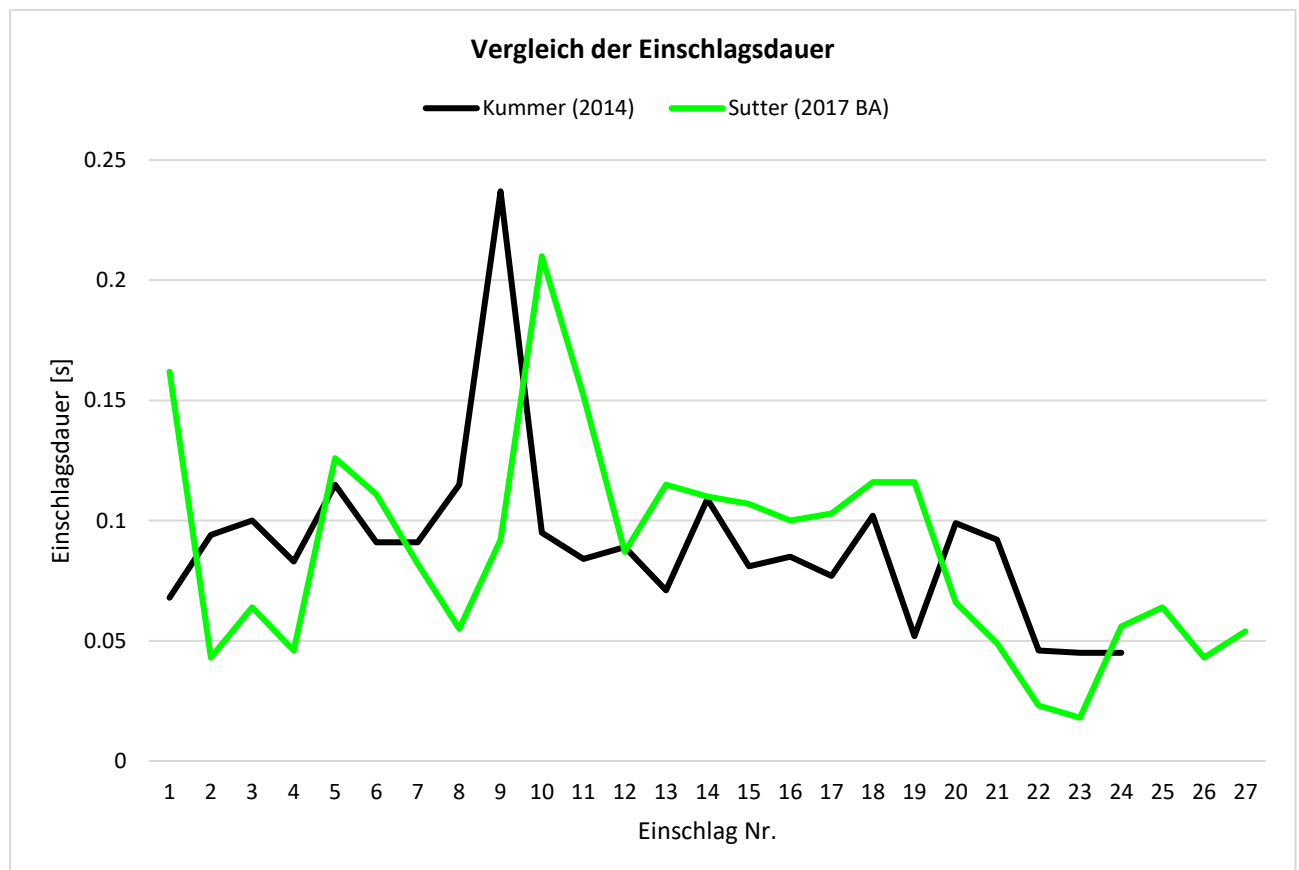


Abbildung 9: Vergleich der Einschlagsdauer von Kummer (2014) und Sutter (2017 BA) von Versuch 009. Mit Sutter (2017 BA) ist die Auswertung der vorliegenden Bachelorarbeit gemeint.

3.6.2 Doppeleinschläge

Vorkommnisse, bei denen es innert so kurzer Zeit zwei Einschläge gegeben hatte, dass im Diagramm keine Flugphase dazwischen erkennbar war, werden in dieser Arbeit Doppeleinschläge genannt (Abbildung 10). In solchen Fällen wurde die Skalierung so stark vergrössert, bis ein genügend grosser Abstand gefunden wurde, den man als Flugphase definieren konnte. In diesem Beispiel entstand so eine Flugphase von 0.018 s. Eine Verifizierung mittels der Videobilder war in solchen Fällen nicht möglich. Weil einerseits die zeitliche Auflösung der Kamera zu klein war und andererseits die Steine während eines Sturzes nicht immer ganz sichtbar sind. Dazu kommt, dass der Stein bei einer so kurzen Flugphase nicht hoch genug springt, um dies, unter den gerade beschriebenen Umständen, erkennen zu können.

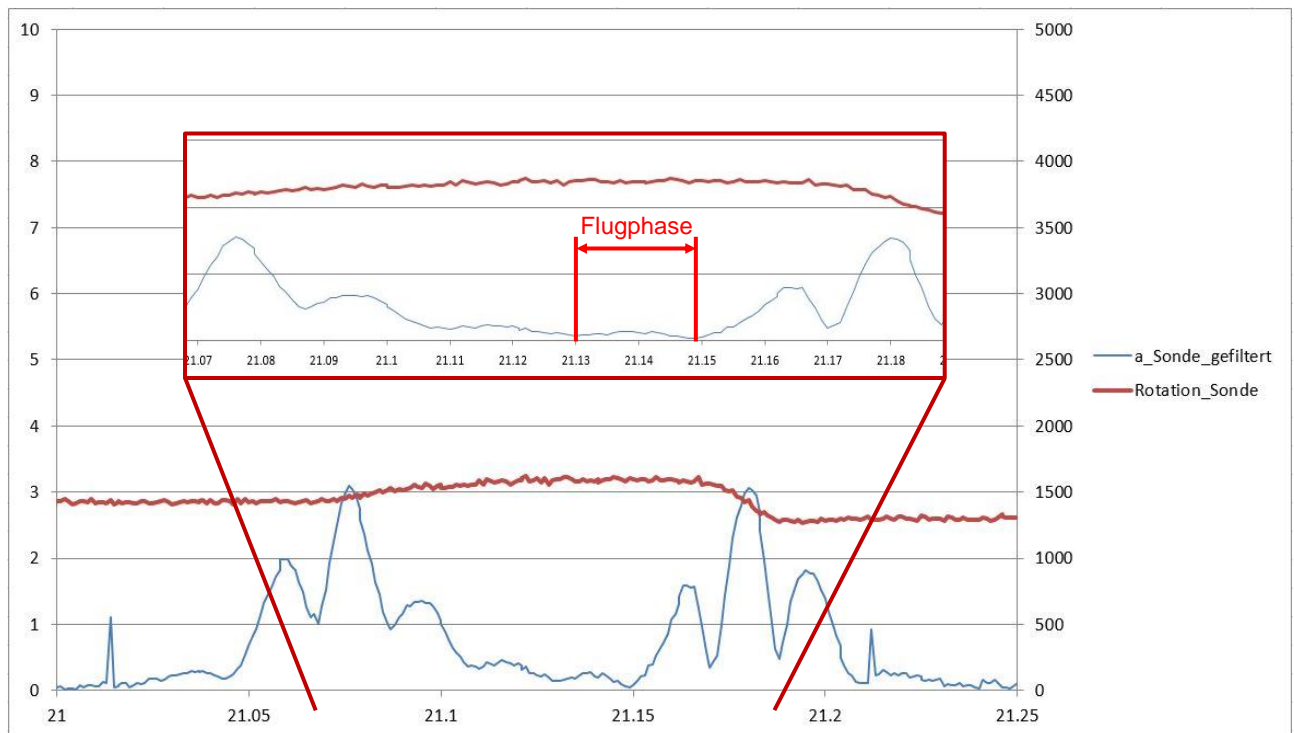


Abbildung 10: Beispiel eines Doppeleinschlages, bei welchem keine klare Flugphase zwischen den beiden Einschlägen erkennbar ist mit Detailskizze für diese Problemlösung.

Weitere Besonderheiten, welche im Verlauf der Auswertungen hervortraten, wie zum Beispiel Buschkontakt während der Sprungphase oder eine Rollphase während des Sturzes, die keinen direkten Einfluss auf die Beschleunigung oder die Flugdauer hatten, werden in Absatz 4.4 beschrieben.

3.7 Statistische Tests

Alle statistischen Auswertungen wurden mit dem Programm RStudio durchgeführt. Bei allen Tests wurde ein Signifikanzniveau von 5 % gewählt. In diesem Fall bedeutet es, dass wenn das Ergebnis eines Testes kleiner als 0.05 ist ($p < 0.05$), die Daten signifikante Unterschiede aufweisen. Das Resultat wird als p-Wert bezeichnet und stammt vom englischen Wort *probability*. Nachfolgend werden die angewendeten Tests kurz erläutert.

3.7.1 Shapiro-Wilk-Test

Mit dem Shapiro-Wilk-Test werden die Daten auf eine allfällige Normalverteilung geprüft. Dieser Test eignet sich für Daten mit 3 bis 5000 Datensätzen (Rahman & Govindarajulu, 1997). In dieser Arbeit wird der Shapiro-Wilk-Test eingesetzt, um die Parameter aller Beschleunigungen im gesamten auf eine Normalverteilung zu testen. Ebenfalls auf Normalverteilung getestet werden die Beschleunigungen im Rahmen der einzelnen Steine, sowie die Dauer der Flugphasen zwischen den Einschlägen und die Dauer der Einschläge selber.

3.7.2 Kolmogorov-Smirnov-Test

Der Kolmogorov-Smirnov Test untersucht bei einer kontinuierlichen Verteilung, ob verschiedene Datensätze untereinander ähnlich verteilt sind (Allen, 1976). In diesem Fall wird der Kolmogorov-Smirnov-Test eingesetzt um zu prüfen, ob die Daten der einzelnen Steine untereinander ähnlich verteilt sind. Konkret ist hier die Frage, ob die Verteilung der Daten innerhalb von Stein 1 der Verteilung innerhalb von Stein 2 ähnelt. Ebenso werden die a_{max} und a_{mean} der Steine 1 und 4 sowie jene der Steine 2 und 4 miteinander verglichen.

3.7.3 Kruskal-Wallis-Test

Falls die Bedingungen der Normalverteilung und echt metrische Daten nicht erfüllt sind, gibt es die parameterfreie Alternative namens Kruskal-Wallis Verfahren. Dieser Test reduziert die Daten auf Ränge und testet auf den Unterschied in der Lage des Medians von drei oder mehr ungepaarten Stichproben (Mürset et al., 2015). Der Kruskal-Wallis-Test wird verwendet, um zu testen ob sich die Messungen der einzelnen Beschleunigungsparameter, auf die Steine zusammengefasst, ähnlich sind. Oder konkreter gesagt, ob die Beschleunigungen, unterteilt in die vier Parameter, über alle drei Steine gesehen Ähnlichkeiten aufweisen.

3.7.4 Pairwise-Wilcoxon-Test

Mit dem Wilcoxon-Test wird getestet, ob sich zwei Mediane signifikant voneinander unterscheiden. Der Pairwise-Wilcoxon-Test ist ein Post-hoc-Test der einfaktoriellen Varianzanalyse. Mit dem «Pairwise» Zusatz werden mehrere Mediane miteinander verglichen und in einer Matrix herausgegeben (Mürset et al., 2015).

Das Pairwise-Wilcoxon-Verfahren dient bei dieser Arbeit dazu zu vergleichen, bei welchen Steinen der Median der Beschleunigungsparameter signifikant anders ist.

4 Resultate

4.1 Horizontale Reichweite der Steine

Wie in Kapitel 2.4 beschrieben, wurden die Steine von definierten Anfangspunkten losgelassen und nach dem Stillstand wurden mittels Tachymeter die Endposition bestimmt. Die Anzahl der Sprünge wurde anhand von den Beschleunigungsdaten bestimmt. Theoretisch wäre auch die Bestimmung mittels, der zwei im Juni 2014 aufgestellten, Hochgeschwindigkeitskameras (50 Bilder pro Sekunde) möglich gewesen. Aber dadurch, dass auf diesen Videos nicht immer die ganzen Trajektorien sichtbar sind, wurden die Videobilder nur in speziellen Fällen, wie dem Buschkontakt, konsultiert.

Wie in Abbildung 11 ersichtlich hat die Anzahl der Sprünge keinen direkten Einfluss auf die horizontale Reichweite der Steine. Der am weitesten gelangte Versuch mit 126.7 m weist lediglich 30 Sprünge auf. Wohingegen jene beiden Versuche mit den meisten Sprüngen (43) lediglich 103.1m respektive 87.2 m erreichten. Allgemein ersichtlich ist aber, dass die Reichweiten von Stein 4 kürzer ausfallen als die der anderen beiden Steinen.

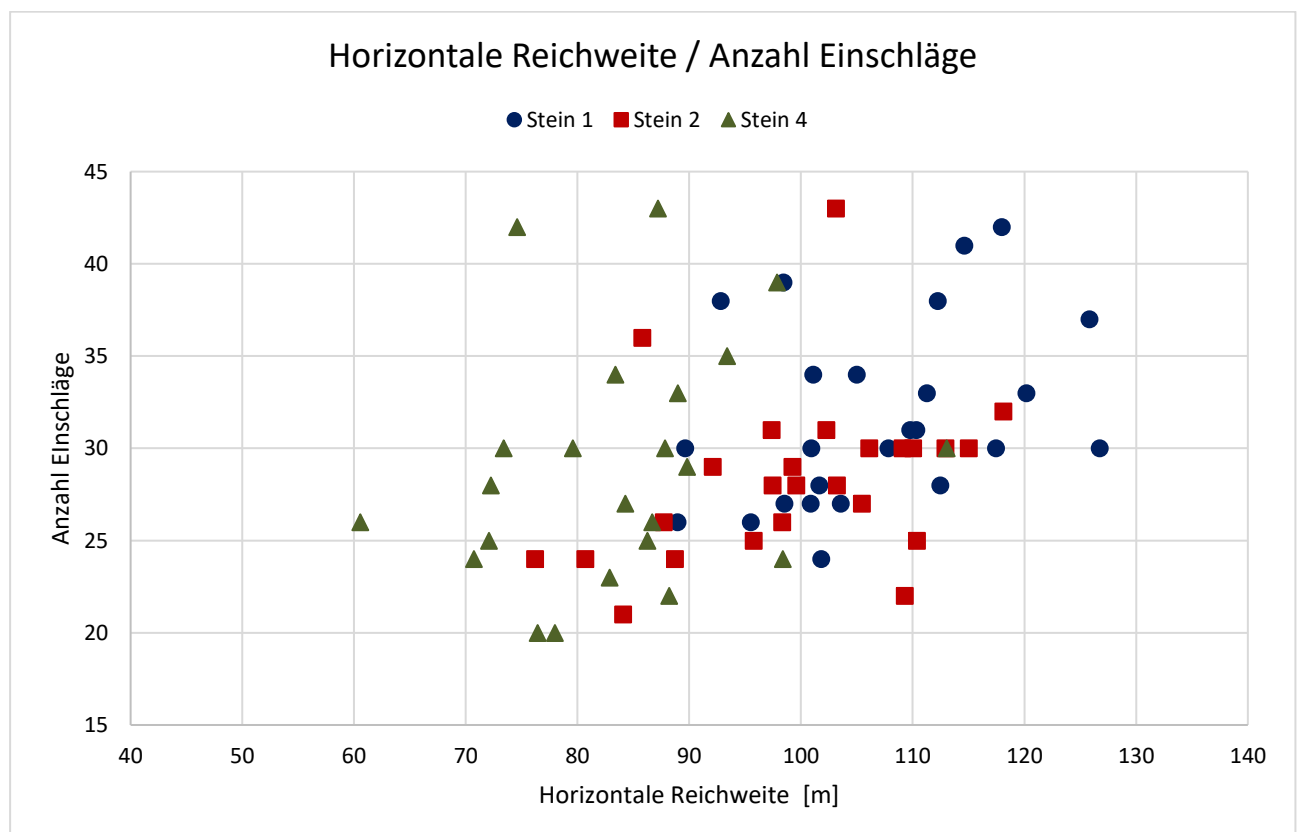


Abbildung 11: Gegenübersetzung der Anzahl Sprünge und der zurückgelegten horizontalen Distanz.

Werden nur die horizontalen Reichweiten aller Versuche, auf die einzelnen Steine aufgeteilt, so wird auch hier ersichtlich, dass die durchschnittliche Reichweite von Stein 4 mit 83.7 m deutlich kürzer reicht als jene von Stein 2 (99.5 m) und Stein 1 (106.6 m) (Abbildung 12 und Tabelle 3).

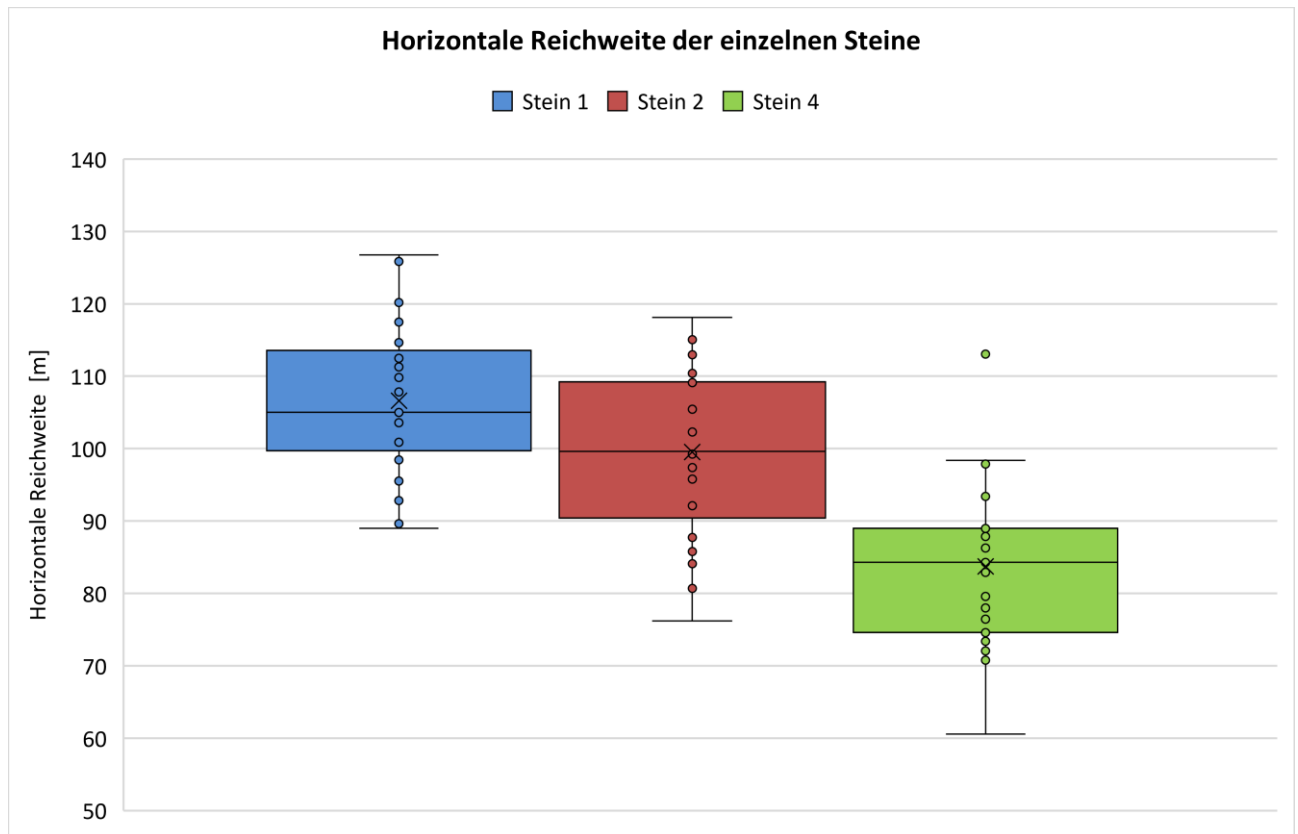


Abbildung 12: Variation der horizontalen Reichweite der einzelnen Steine.

Die Standardabweichung (SD) der horizontalen Reichweite aller drei Steine bewegt sich ungefähr auf dem gleichen Niveau.

Tabelle 3: Durchschnittliche horizontale Reichweiten der einzelnen Steine, sowie der Standardabweichungen der horizontalen Reichweiten und der Anzahl durchgeführter Versuche.

Stein Nr.	Ø Reichweite [m]	SD [m]	Anzahl Versuche
1	106.6	10.2	26
2	99.5	10.9	27
4	83.7	11.0	25

Teilt man die horizontalen Reichweiten auf die unterschiedlichen Startpositionen auf, so kann keine klare Tendenz erkannt werden, ob der Startpunkt einen Einfluss auf die horizontale Reichweite der einzelnen Versuche hatte (Abbildung 13).

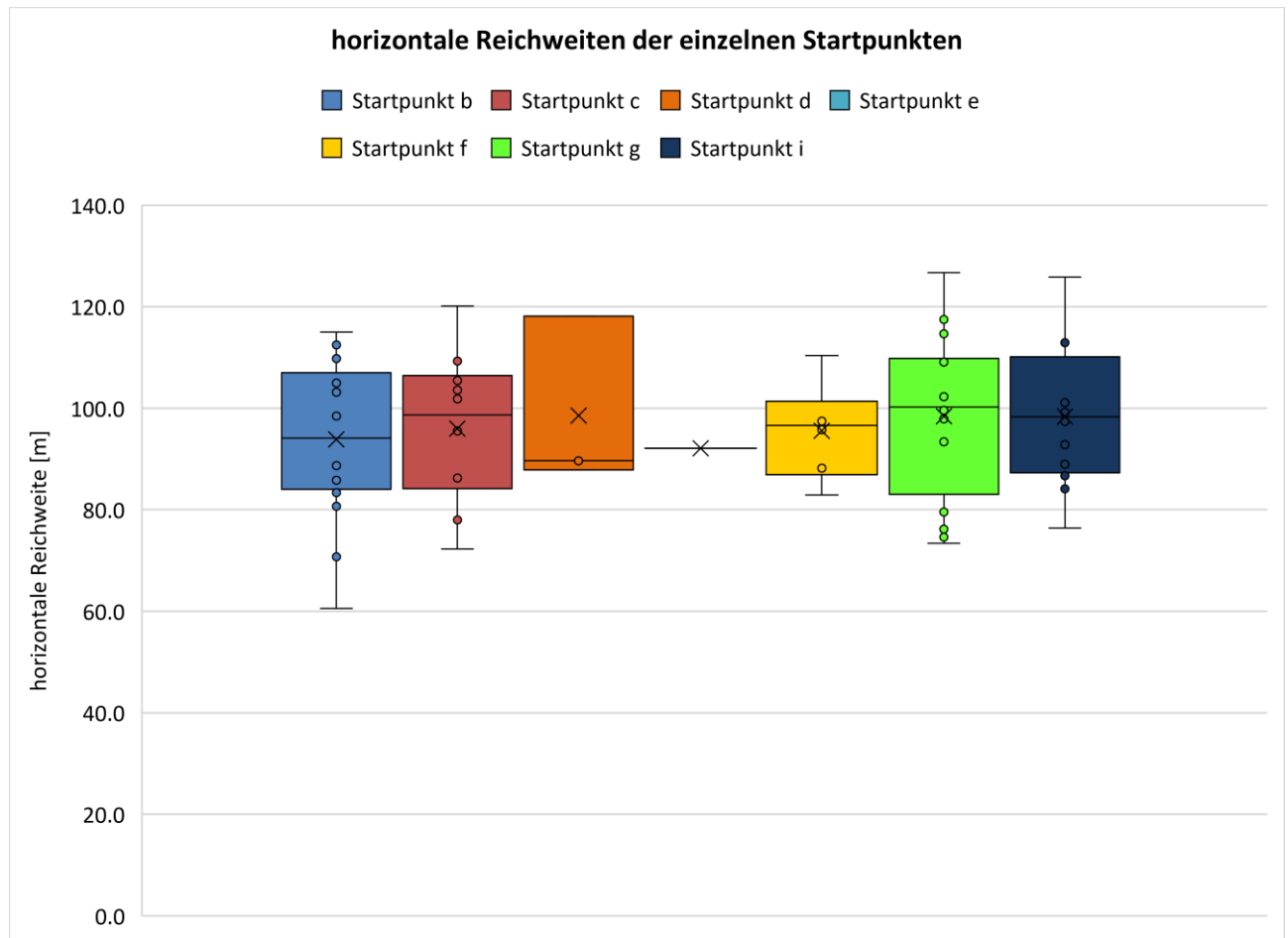


Abbildung 13: Übersicht der Variation der horizontalen Reichweite von den einzelnen Startpunkten aus.

In Tabelle 4 zeigt sich, dass die Differenz der durchschnittlichen horizontalen Reichweiten lediglich 8.3 m beträgt. Hierbei erreichten die Versuche von Startpunkt f mit durchschnittlich 100.4 m die höchste horizontale Reichweite. Der Versuch von Startpunkt e erreichte 92.1 m. Hierbei muss man aber aufpassen, weil von Startpunkt e aus lediglich ein einzelner Versuch gemacht wurde, welcher in die Auswertung dieser Arbeit eingeflossen ist. Auch die durchschnittliche horizontale Reichweite von Startpunkt d mit nur drei Versuchen ist nicht wirklich repräsentativ (Tabelle 4). Die Standardabweichung der horizontalen Reichweiten sind relativ hoch, liegen startpunktübergreifend aber ziemlich nahe beieinander.

Tabelle 4: Durchschnittliche horizontale Reichweiten der einzelnen Startpunkte, sowie der Standardabweichungen der horizontalen Reichweiten und die Anzahl Versuche mit den einzelnen Steinen.

Startpunkt	Anzahl Versuche	Ø Reichweite [m]	SD [m]
b	24	93.9	14.7
c	10	96.0	14.1
d	3	98.5	13.9
e	1	92.1	-
f	10	100.4	11.4
g	16	98.4	15.4
i	14	99.1	13.1

Die Tatsache, dass Stein 1 die durchschnittlich grösste Reichweite aufweist wird noch deutlicher, wenn die horizontalen Reichweiten nicht nur nach den Steinen, sondern auch nach Startpunkt aufgeteilt werden (Tabelle 5). Ausser bei dem einen Versuch von Startpunkt d aus, sind die Reichweiten von Stein 1 von jedem Startpunkt aus deutlich höher (mind. 4.5 m) als die der restlichen zwei. Ebenso bestätigt sich auch, dass Stein 4 jeweils die kürzesten horizontalen Reichweiten erreicht hat.

Tabelle 5: Aufteilung der horizontalen Reichweite und deren Standardabweichung in die Startpunkte und Steine.

Startpunkt	Anzahl Versuche mit Stein Nr.			Ø Reichweite mit Stein Nr. [m]			SD der Reichweiten [m]		
	1	2	4	1	2	4	1	2	4
b	8	8	8	104.4	97.5	78.3	7.8	11.6	9.9
c	4	3	3	105.3	100.8	78.8	9.1	9.4	5.7
d	1	1	1	89.6	118.1	87.9	-	-	-
e	-	1	-	-	92.1	-	-	-	-
f	3	3	4	115.1	101.2	89.8	2.9	6.5	6.4
g	5	6	5	112.1	99.3	83.8	10.0	11.2	10.0
i	5	5	4	105.8	98.4	91.3	11.1	10.2	13.4

Werden die Anzahl der Einschläge, von den einzelnen Startpunkten aus, miteinander verglichen, so lässt sich erkennen, dass die Versuche von Startpunkt c, am wenigsten Einschläge aufweisen (Abbildung 14). Ein Blick auf Tabelle 6 bestätigt dies, da Startpunkt c mit durchschnittlich 25.8 Einschlgen pro Versuch den tiefsten Wert aufweist. Die höchste Quote von 31.4 Sprüngen im Durchschnitt haben jene Steine, welche von Startpunkt g losgelassen wurden. Die restlichen durchschnittlichen Anzahlen der Einschläge der übrigen Startpunkte liegen mit einem Spektrum von 27.4 und 30.7 ziemlich nahe beieinander. Die Standardabweichungen der durchschnittlichen Anzahl Einschlgen sind ziemlich weit gestreut (0.9-13.1).

Tabelle 6: Durchschnittliche Anzahl Einschläge, sowie deren Standardabweichungen.

Startpunkt	Anzahl Versuche	Ø Anzahl Einschläge	SD
b	24	30.6	5.4
c	10	25.8	3.3
d	3	30.7	0.9
e	1	29.0	-
f	10	27.4	7.2
g	16	31.4	5.0
i	14	29.6	13.1

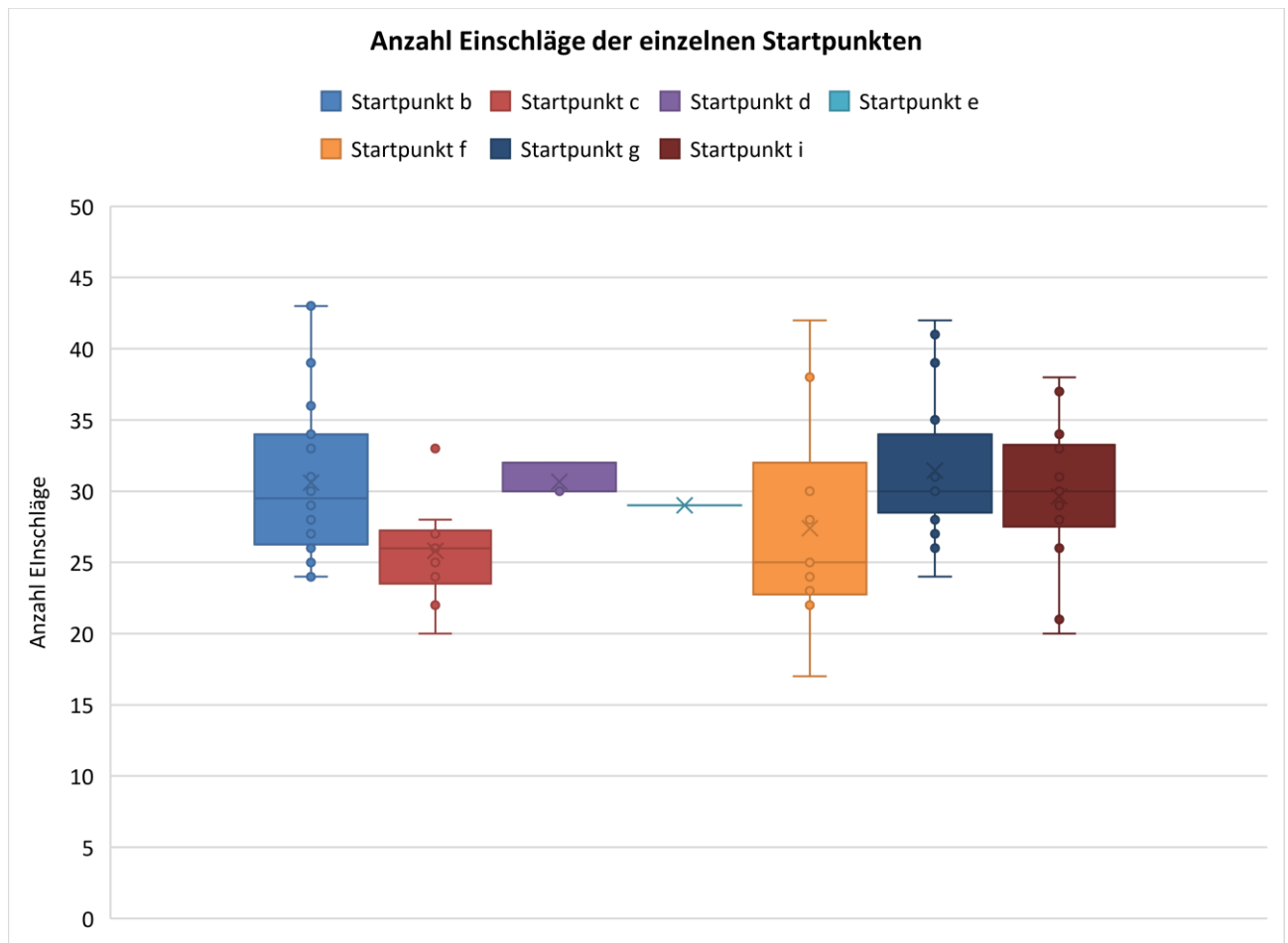


Abbildung 14: Übersicht der Anzahl Sprünge von den einzelnen Startpunkten aus.

Wenn die Anzahl Einschläge ebenfalls noch nach Startpunkt und Stein ausgewertet wird, zeigt sich auch hier, dass Stein 1 die höchsten Werte aufweist. Ausnahme sind wiederum die Versuche von Startpunkt d aus, da dort aber jeder Stein nur einmal losgelassen wurde ist dieses Resultat nicht wirklich aussagekräftig. Und wiederum ist es auch bei den Einschlgen der Fall, dass Stein 4 die kleinsten Werte aufzuweisen hat. Ausser bei den Versuchen von Startpunkt g aus hat Stein 4 die deutlich höchste Anzahl an Einschlgen gehabt (Tabelle 7).

Tabelle 7: Aufteilung der Anzahl Einschläge und deren Standardabweichung in die Startpunkte und Steine.

Startpunkt	Anzahl Versuche mit Stein Nr.			Ø Anzahl Einschläge			SD der Einschläge		
	1	2	4	1	2	4	1	2	4
b	8	8	8	31.1	30.4	30.3	4.0	6.0	6.0
c	4	3	3	27.5	25.0	24.3	3.4	2.2	3.3
d	1	1	1	30.0	32.0	30.0	-	-	-
e	-	1	-	-	29.0	-	-	-	-
f	3	3	4	36.7	26.0	21.5	5.0	1.4	2.7
g	5	6	5	31.6	28.2	35.2	4.8	2.5	4.8
i	5	5	4	33.4	27.8	27.3	3.9	3.5	4.9

4.2 Beschleunigungen

Bei den Beschleunigungen wurden die Daten, wie in Tabelle 8 beschrieben, in die Parameter `a_max_gefiltert`, `a_max_ungefiltert`, `a_mean_gefiltert` und `a_mean_ungefiltert` eingeteilt. Sämtliche Werte der Beschleunigungen liegen in der Masseinheit g ($1g = 9.81m/s^2$) vor.

Tabelle 8: Beschreibung der verschiedenen Beschleunigungsparameter.

Bezeichnung	Beschreibung
<code>a_max_gefiltert</code>	Maxima der jeweiligen Einschlagdauer der gefilterten Daten.
<code>a_max_ungefiltert</code>	Maxima der jeweiligen Einschlagdauer der ungefilterten Daten.
<code>a_mean_gefiltert</code>	Alle Datenpunkte über die gesamte Einschlagdauer gemittelt, der gefilterten Daten.
<code>a_mean_ungefiltert</code>	Alle Datenpunkte über die gesamte Einschlagdauer gemittelt, der ungefilterten Daten.

Wie in Sutter (2017) wurde in dieser Arbeit mit dem Mittelwert und nicht mit dem Median gearbeitet. Der Unterschied vom Mittelwert gegenüber dem Median wird in Tabelle 1 aufgeführt. Bei den a_mean Parametern läge der Unterschied bei weniger als 0.5 g. Bei den a_max sind die Unterschiede mit bis zu fast 7 g viel grösser, da beim Mittelwert alle Messungen, also auch die extrem hohen, einen Einfluss haben und als Resultat angibt wie hoch die Beschleunigung wäre, wenn es eine Konstante wäre. Im Gegensatz dazu wird beim Median jener Wert gesucht, welcher in der Mitte der Zahlenreihe steht. Dies bedeutet, dass der Einfluss von sehr hohen Einzelwerten gering ist. Dies ist gut sichtbar, da der Median der a_max deutlich tiefer liegt als beim Mittelwert. Deshalb sind bei den Werten des Medians zwischen den Parameter mit den Ausreissern und jenen ohne Ausreisser fast identisch.

Tabelle 9: Gegenüberstellung der Durchschnitte und Median der einzelnen Parameter über alle Messungen gesehen. Das *ohne* steht hierbei für die Messungen ohne Ausreisser.

Parameter	Mittelwert [g]	Median [g]	Differenz [g]
a_max_gefiltert	12.64	5.80	6.84
a_max_gefiltert ohne	8.64	5.49	3.15
a_max_ungefiltert	21.53	14.66	6.87
a_max_ungefiltert ohne	17.34	14.27	3.07
a_mean_gefiltert	1.89	1.50	0.39
a_mean_gefiltert ohne	1.69	1.46	0.23
a_mean_ungefiltert	5.43	4.94	0.49
a_mean_ungefiltert ohne	5.26	4.84	0.42

4.2.1 Ausreisser

Um möglichst realitätsnahe Resultate zu erhalten, wurden die grössten Ausreisser der Einschläge gelöscht. Als grobe Ausreisser werden in dieser Arbeit, wie bereits bei Sutter (2017), Einschläge mit extrem hohen Beschleunigungsspitzen von >50 g bei a_max_gefiltert oder >80 g bei a_max_ungefiltert gewertet. Dies aber nur, wenn es nur ein einzelner Datenpunkt mit einer solch hohen Beschleunigung war. Falls mehrere solche hohen Beschleunigungen direkt nacheinander aufgetreten wären, wären diese nicht als Ausreisser definiert worden. Dies war jedoch nicht der Fall.

Der Vollständigkeit halber werden aber auch die Daten mit den Ausreissern ausgewertet und vorgestellt. Von gesamthaft 2307 Einschlügen wurden 84 als Ausreisser definiert. Dies entspricht einer Ausreisserquote von 3.7 %. Diese 84 Ausreisser setzen sich aus 26 Einschlügen mit Stein 1 und je 29 von Stein 2 und Stein 4 zusammen.

4.2.2 Gefiltert und ungefiltert

Um den Einfluss des Filters zu bestimmen, wurde, für die Parameter a_{\max} und a_{mean} mit und ohne Ausreisser, der Bestimmtheitsgrad berechnet. Die dabei erhaltenen R^2 -Werte sind in Tabelle 10 aufgeführt. Dabei gilt, je näher der Wert bei 1, desto kleiner ist der Einfluss des Filters. Es fällt auf, dass der Parameter a_{\max} mit Ausreissern einen hohen R^2 -Wert von 0.9637 hat. Den niedrigsten R^2 -Wert, mit lediglich 0.4752, weisen die a_{mean} ohne Ausreisser auf. Ebenfalls wurde mit RStudio berechnet, ob eine Verbesserung des R^2 -Wertes erreicht werden kann, indem die Trendgerade in eine Parabel 2. Grades umgerechnet wird. Tatsächlich brachte diese Umrechnung aber nur beim Parameter a_{mean} mit Ausreissern eine deutliche Verbesserung. Bei allen anderen Parametern ist nur eine sehr geringe positive Änderung des R^2 -Wertes feststellbar.

Tabelle 10: R^2 -Werte des Bestimmtheitsgrades der verschiedenen Parameter

Parameter	R^2 -Wert mit Regressionsgeraden	R^2 -Wert mit Regressionsparabel zweiten Grades
a_{\max} mit Ausreissern	0.9637	0.9672
a_{\max} ohne Ausreisser	0.7921	0.7948
a_{mean} mit Ausreissern	0.4945	0.5609
a_{mean} ohne Ausreisser	0.4752	0.4781

In Abbildung 15 und Abbildung 16 werden die Maxima der gefilterten und ungefilterten Daten mit und ohne Ausreisser gegenübergestellt. Bei den a_max mit den Ausreissern ist der hohe R²-Wert sehr gut ersichtlich. Dies zeigt sich durch die geringe Abweichung der Datenpunkte von der Regressionsgeraden. Bei den a_max ohne den Ausreissern sind die Datenpunkte einiges weiter um die Regressionsfunktion (Gerade wie auch Parabel zweiten Grades) gestreut.

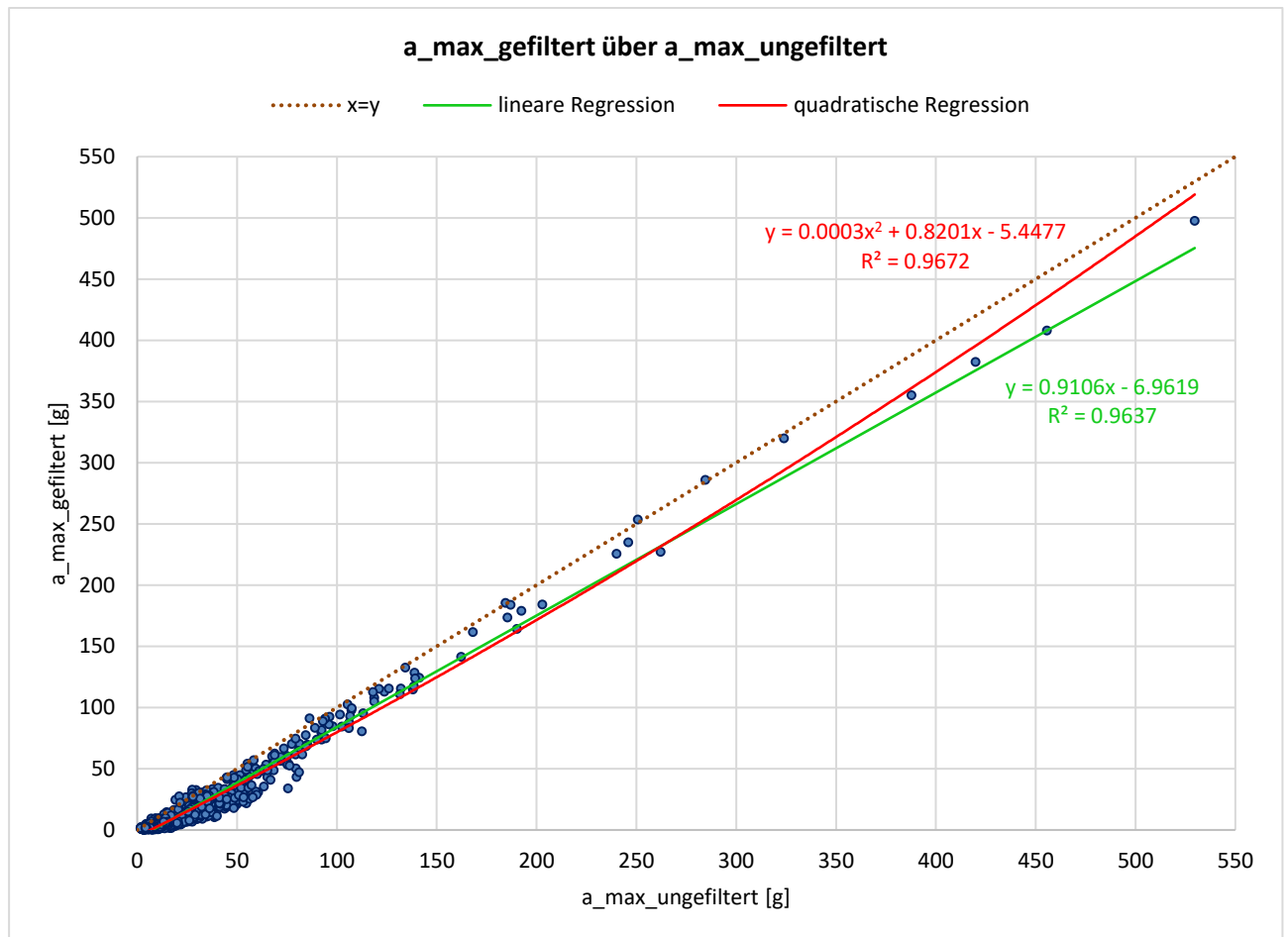


Abbildung 15: Gegenüberstellung von a_max_gefiltert und a_max_ungefiltert, mit den Ausreissern, mit Regressionskurven, um zu veranschaulichen, wie gross der Einfluss des Filterns ist.

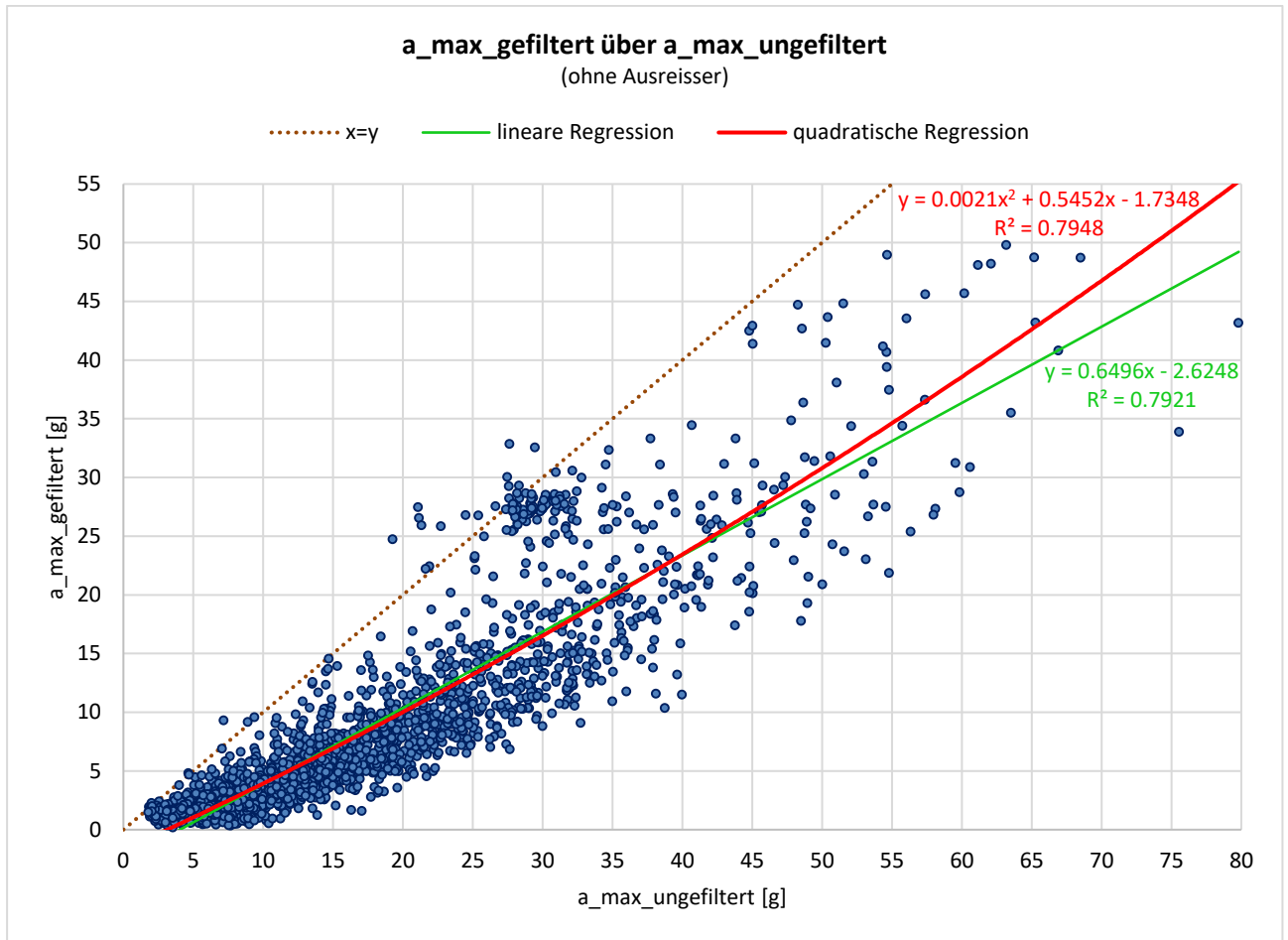


Abbildung 16: Gegenüberstellung von a_max_gefiltert und a_max_ungefiltert, ohne Ausreisser, mit Regressionskurven, um zu veranschaulichen, wie gross der Einfluss des Filterns ist.

In Abbildung 17 und Abbildung 18 werden die Mittelwerte der gefilterten und ungefilterten Daten mit und ohne Ausreisser gegenübergestellt. Bei den a_mean mit den Ausreissern sieht man die Verbesserung des R^2 -Wertes, durch die Umwandlung der Regressionsgeraden in eine Parabel zweiten Grades, aufgrund der relativ grossen Abweichung der Parabel von der Geraden. Nichts desto trotz sind R^2 -Werte von 0.5609 mit den Ausreissern und 0.4781 ohne den Ausreissern schlecht.

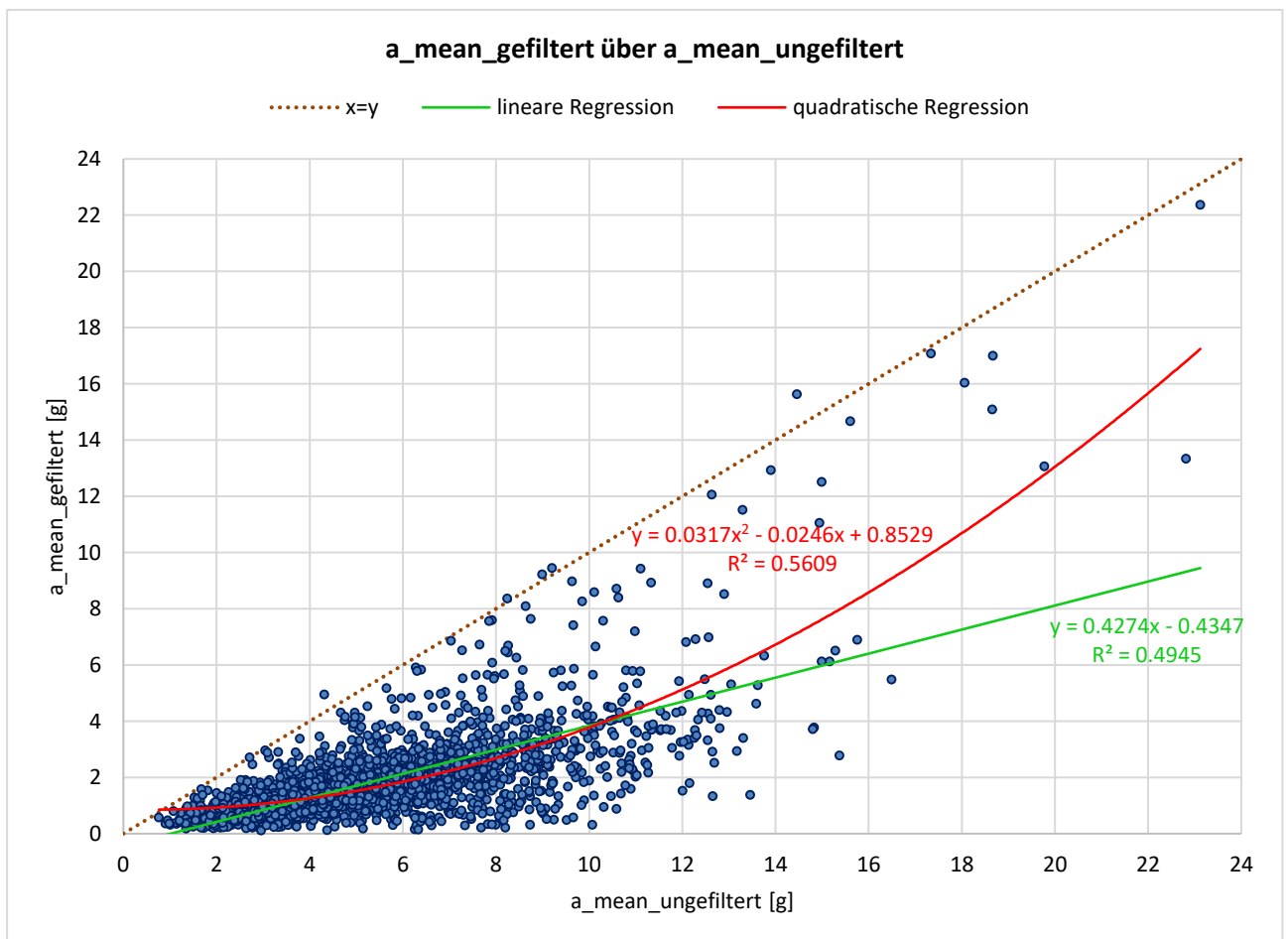


Abbildung 17: Gegenüberstellung von a_mean_gefiltert und a_mean_ungefiltert, mit den Ausreissern, mit Regressionskurven, um zu veranschaulichen, wie gross der Einfluss des Filterns ist.

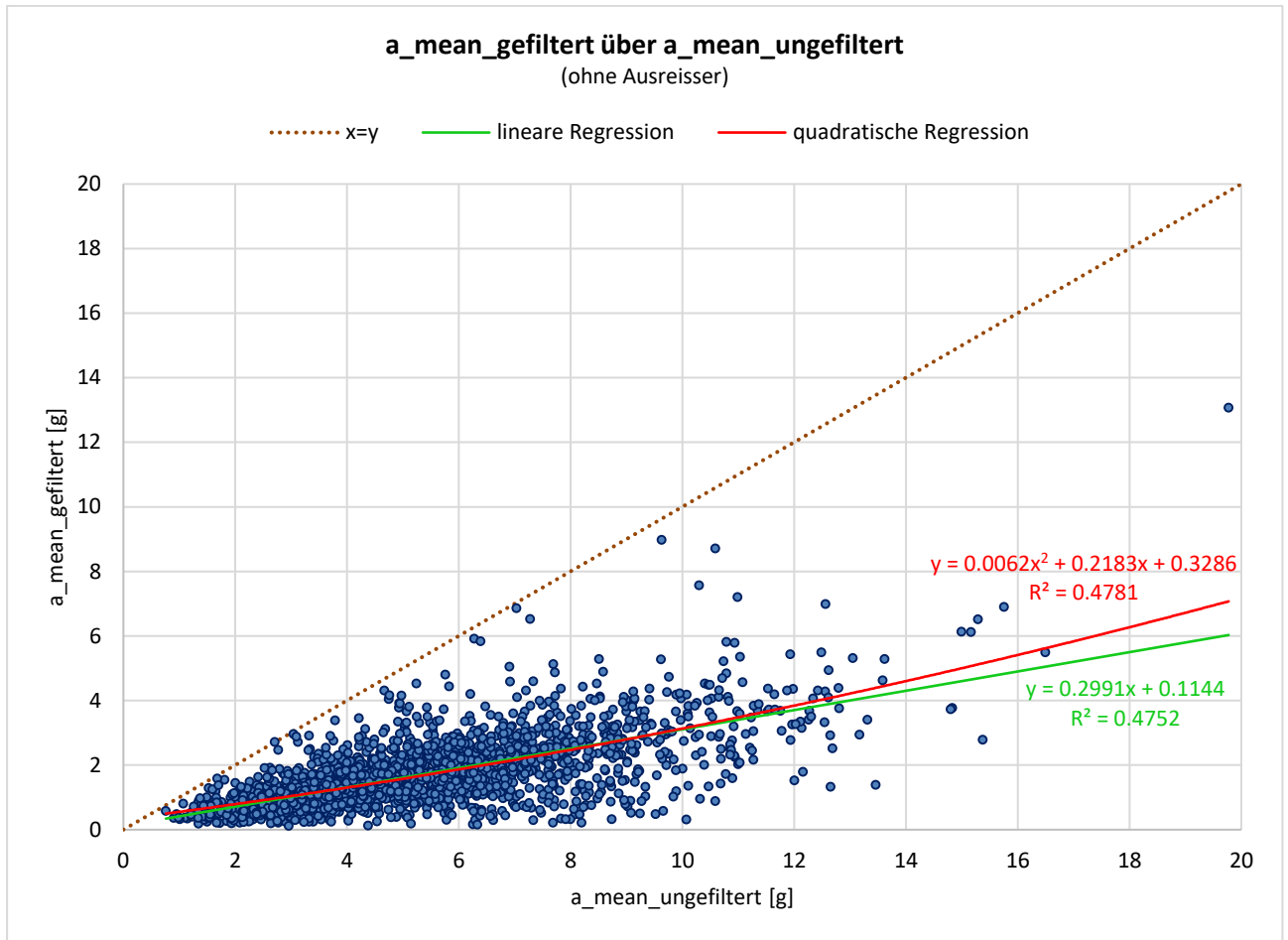


Abbildung 18: Gegenüberstellung von a_mean_gefiltert und a_mean_ungefiltert, ohne Ausreisser, mit Regressionskurven, um zu veranschaulichen, wie gross der Einfluss des Filterns ist.

4.2.3 Normalverteilungen

Mit dem Shapiro-Wilk-Test wurden die Beschleunigungsdaten auf eine Normalverteilung getestet. Bei den, in Tabelle 11 aufgelisteten p-Werten, wurde noch keine Unterteilung vorgenommen, sondern lediglich alle gemessenen Werte zusammen getestet. Daraus ist ersichtlich, dass keiner der Beschleunigungsparameter einer Normalverteilung folgt.

Tabelle 11: p-Werte des Shapiro-Wilk-Testes bei der Frage ob alle Daten innerhalb der jeweiligen Beschleunigungsparameter normal verteilt sind.

Test Parameter	Shapiro Wilk (p-Wert) Mit Ausreisser	Shapiro Wilk (p-Wert) Ohne Ausreisser
a_max_gefiltert	<2.2e-16	<2.2e-16
a_max_ungefiltert	<2.2e-16	<2.2e-16
a_mean_gefiltert	<2.2e-16	<2.2e-16
a_mean_ungefiltert	<2.2e-16	<2.2e-16

Zur besseren Verständlichkeit der Werte aus Tabelle 11, werden die Verteilungen dieser vier Parameter bildlich in Form der folgenden Histogramme (Abbildung 19 und Abbildung 20) dargestellt.

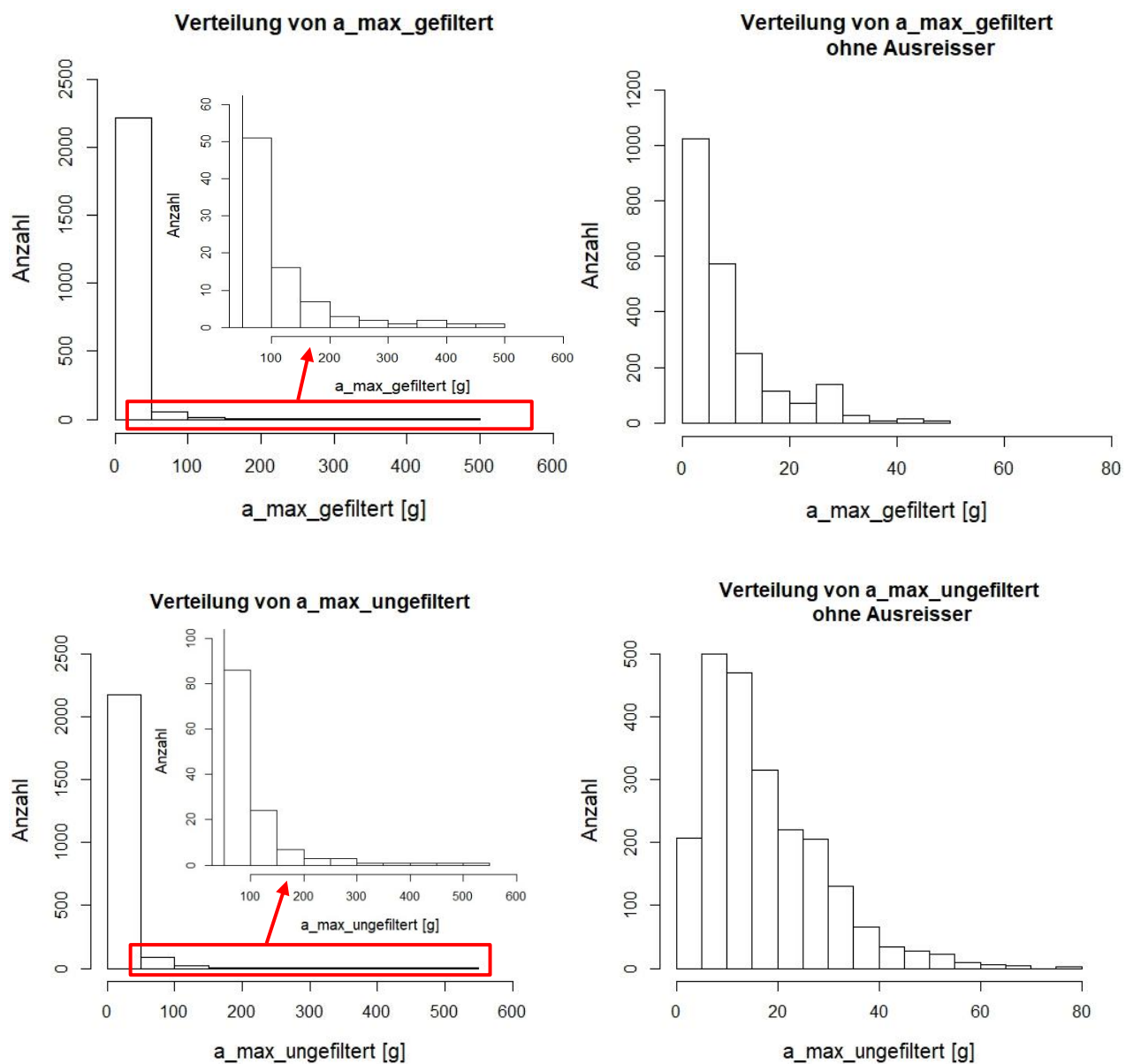


Abbildung 19: Histogramme aller maximalen Beschleunigungen auf die jeweiligen Parameter verteilt.

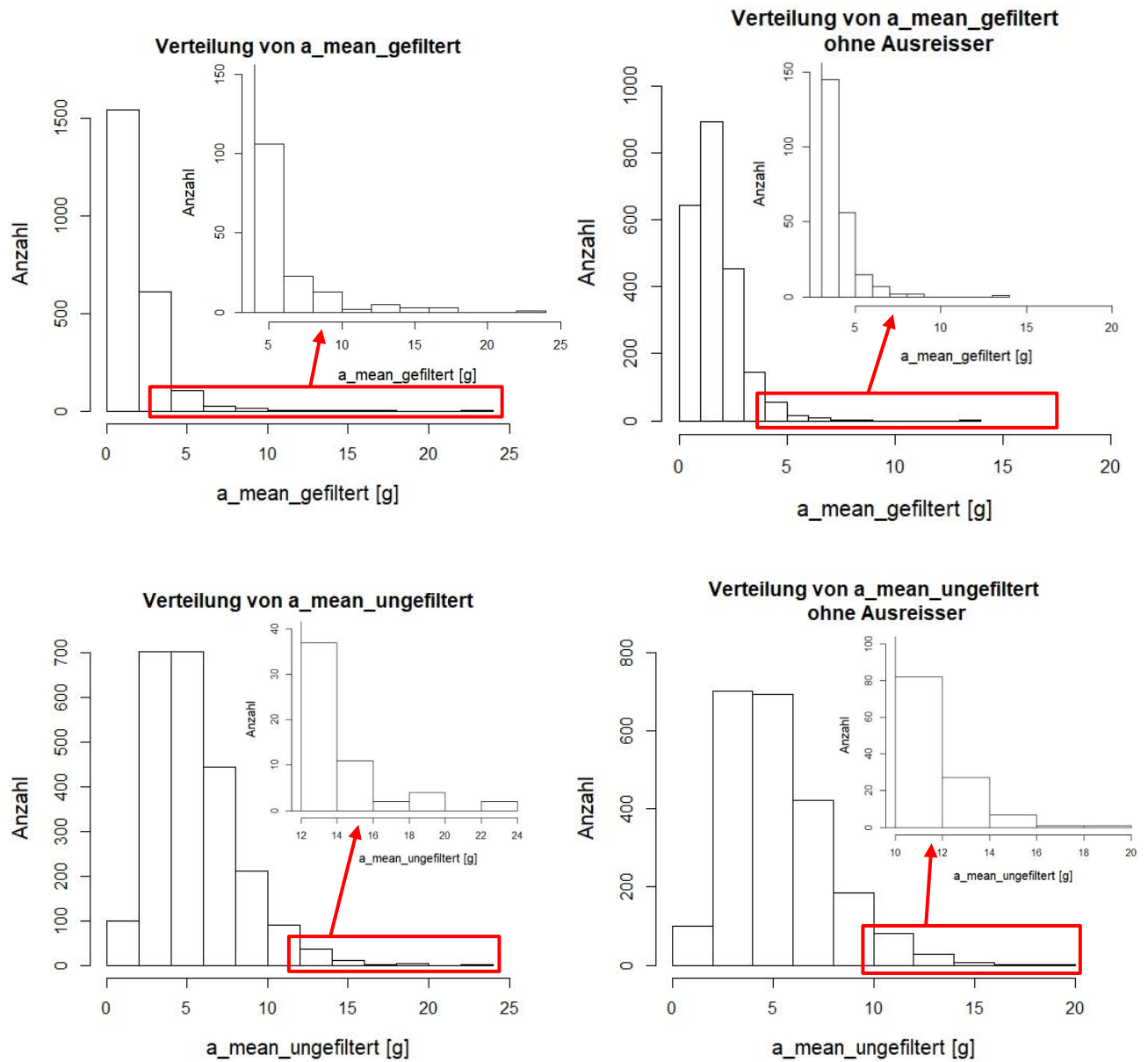


Abbildung 20: Histogramme aller durchschnittlichen Beschleunigungen auf die jeweiligen Parameter verteilt.

Tabelle 12 zeigt die Auswertung der Normalverteilungsprüfung, mit dem Shapiro-Wilk-Test, auf die einzelnen Steine aufgeteilt. Auch innerhalb der einzelnen Steine liegt keine Normalverteilung der Daten vor. Bei den Daten in Tabelle 12 sind die Ausreisser mitberücksichtigt.

Tabelle 12: p-Werte des Shapiro-Wilk-Testes bei der Frage ob sich die Daten innerhalb der einzelnen Steine und der jeweiligen Beschleunigungen ähnlich sind. In diesen Daten sind die Ausreisser mit einbezogen.

Test Parameter	Shapiro Wilk (p-Wert) Stein 1	Shapiro Wilk (p-Wert) Stein 2	Shapiro Wilk (p-Wert) Stein 4
a_max_gefiltert	<2.2e-16	<2.2e-16	<2.2e-16
a_max_ungefiltert	<2.2e-16	<2.2e-16	<2.2e-16
a_mean_gefiltert	<2.2e-16	<2.2e-16	<2.2e-16
a_mean_ungefiltert	<2.2e-16	<2.2e-16	<2.2e-16

Bei den Resultaten des Shapiro-Wilk-Tests ohne die Ausreisser (Tabelle 13) ist sichtbar, dass auch diese Daten keiner Normalverteilung folgen.

Tabelle 13: p-Werte des Shapiro-Wilk-Testes bei der Frage ob sich die Daten innerhalb der einzelnen Steine und der jeweiligen Beschleunigungen ähnlich sind. In diesen Daten sind die Ausreisser nicht mit einbezogen.

Test Parameter	Shapiro Wilk (p-Wert) Stein 1	Shapiro Wilk (p-Wert) Stein 2	Shapiro Wilk (p-Wert) Stein 4
a_max_gefiltert	<2.2e-16	<2.2e-16	<2.2e-16
a_max_ungefiltert	<2.2e-16	<2.2e-16	<2.2e-16
a_mean_gefiltert	<2.2e-16	<2.2e-16	<2.2e-16
a_mean_ungefiltert	<2.2e-16	2.623e-15	2.809e-15

Die Histogramme zu all den, auf die Steine aufgeteilten, Parametern sind im Anhang D zu finden.

4.2.4 Ähnlichkeiten der Beschleunigungsverteilung der einzelnen Steine

Mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test wurde getestet, ob die Verteilungen der Beschleunigungen, aufgeteilt auf die einzelnen Steine, ähnlich zueinander sind. In Tabelle 14 sind die Ähnlichkeiten zwischen den Steinen mit den Ausreissern aufgeführt.

Tabelle 14: Mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test verglichene Verteilungen der Parameter zwischen den einzelnen Steinen, mit Berücksichtigung der Ausreisser. Die hervorgehobenen Werte stehen für die gefundenen Ähnlichkeiten.

Stein Nr. Daten	Stein 1 zu Stein 2 (p-Wert)	Stein 1 zu Stein 4 (p-Wert)	Stein 2 zu Stein 4 (p-Wert)
a_max_gefiltert	0.026	0.001	1.862e-04
a_max_ungefiltert	0.103	1.282e-05	7.955e-07
a_mean_gefiltert	0.416	2.832e-04	0.017
a_mean_ungefiltert	0.192	0.459	0.085

Abgesehen von a_max_gefiltert bestehen bei den übrigen drei Parametern Ähnlichkeiten innerhalb der Verteilungen von Stein 1 und Stein 2. Die Vergleiche der Verteilungen von Stein 1 zu Stein 4, sowie von Stein 2 zu Stein 4 ergeben, ausser bei a_mean_ungefiltert, signifikante Unterschiede.

Die Resultate desselben Tests, von den Daten ohne den Ausreissern, sind in den p-Werten leicht anders. Das Fazit daraus ist allerdings genau das gleiche, wie jene mit den Ausreissern. Auch hier gibt es bei den a_mean_ungefiltert über alle Steine gesehen, Ähnlichkeiten. Ebenso sind die Verteilungen innerhalb von a_max_ungefiltert und a_mean_gefiltert von Stein 1 und Stein 2 einander ähnlich (Tabelle 15). Bei den restlichen Vergleichen der Parameter sind keine weiteren Ähnlichkeiten festgestellt worden.

Tabelle 15: Mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test verglichene Verteilungen der Parameter zwischen den einzelnen Steinen. Die Ausreisser sind hier weggelassen. Die hervorgehobenen Werte stehen für die gefundenen Ähnlichkeiten.

Stein Nr. Daten	Stein 1 zu Stein 2 (p-Wert)	Stein 1 zu Stein 4 (p-Wert)	Stein 2 zu Stein 4 (p-Wert)
a_max_gefiltert	0.023	0.002	1.533e-04
a_max_ungefiltert	0.098	1.402e-05	5.396e-07
a_mean_gefiltert	0.493	3.989e-04	0.016
a_mean_ungefiltert	0.157	0.289	0.087

In Anhang E sind die Diagramme zu diesen Tests zu finden.

4.2.5 Vergleich der Daten zwischen den einzelnen Steinen

In Tabelle 16 aufgelistet sind die p-Werte des Kruskal-Wallis-Tests, für die Frage, ob sich die Mediane der Beschleunigungsdaten aller drei Steine ähneln.

Wiederum sind sich lediglich die Mittelwerte von a_mean_ungefiltert ähnlich. Die restlichen Parameter weisen signifikante Unterschiede auf. Auch hier besteht kein Unterschied zwischen den Daten mit und jenen ohne Ausreisser.

Tabelle 16: Resultate des Kruskal-Wallis-Tests zur Frage, ob die Messungen der einzelnen Parameter, zusammengefasst zu den Steinen, ähnlich sind. Die hervorgehobenen Werte stehen für die gefundenen Ähnlichkeiten.

Parameter \ Test	Kruskal-Wallis-Test mit Ausreisser (p-Wert)	Kruskal-Wallis-Test ohne Ausreisser (p-Wert)
a_max_gefiltert	3.047e-05	2.721e-05
a_max_ungefiltert	4.024e-08	2.171e-08
a_mean_gefiltert	0.003	0.004
a_mean_ungefiltert	0.082	0.055

Als letztes wurden die Mediane der einzelnen Parameter mit dem Pairwise-Wilcoxon-Test steinweise miteinander verglichen. Die Resultate besagen, ob sich die Mediane der einzelnen Steine signifikant ähnlich sind oder nicht.

Wie bei allen vorherigen Tests, bei welchen es darum ging die Daten der einzelnen Steine miteinander zu vergleichen, zeigt sich hier dasselbe Bild. Die Parameter a_max_ungefiltert, a_mean_gefiltert und a_mean_ungefiltert der Steine 1 und 2 sind sich ähnlich. Und ebenfalls sind sich die Mediane von a_mean_ungefiltert aller dreier Steine ähnlich. Neu ist beim Pairwise-Wilcoxon-Test jedoch, dass sich auch die Mediane des a_max_gefiltert von Stein 1 und Stein 2 ähneln (Tabelle 17).

Tabelle 17: p-Werte der Auswertung bezüglich der Ähnlichkeiten der Mediane der verschiedenen Steine mit Ausreissern. Die hervorgehobenen Werte stehen für die gefundenen Ähnlichkeiten.

	a_max_gefiltert		a_max_ungefiltert		a_mean_gefiltert		a_mean_ungefiltert	
	Stein 1	Stein 2	Stein 1	Stein 2	Stein 1	Stein 2	Stein 1	Stein 2
Stein 2	0.515	-	0.515	-	0.74	-	0.077	-
Stein 4	9.1e-05	4.5e-10	0.004	0.020	4.1e-06	2.3e-07	0.434	0.349

Im Vergleich zu den Daten mit Ausreissern, gibt es bei jenen ohne Ausreisser eine Veränderung. Und zwar weisen hier die Mediane von a_mean_ungefiltert bei Stein 1 und Stein 2 signifikante Unterschiede auf. Die restlichen Resultate sind im Endeffekt (signifikant unterschiedlich oder nicht) gleich wie jene mit Ausreissern (Tabelle 18).

Tabelle 18: p-Werte der Auswertung bezüglich der Ähnlichkeiten der Mediane der verschiedenen Steine ohne die Daten der Ausreisser. Die hervorgehobenen Werte stehen für die gefundenen Ähnlichkeiten.

	a_max_gefiltert		a_max_ungefiltert		a_mean_gefiltert		a_mean_ungefiltert	
	Stein 1	Stein 2	Stein 1	Stein 2	Stein 1	Stein 2	Stein 1	Stein 2
Stein 2	0.612	-	0.613	-	0.59	-	0.046	-
Stein 4	1.1e-04	2.8e-04	0.006	0.0172	5.0e-06	7.3e-08	0.396	0.396

4.2.6 Vergleich der Beschleunigungen der einzelnen Steine

Werden die durchschnittlichen Beschleunigungen mit den Ausreissern der einzelnen Steine miteinander verglichen, wird ersichtlich, dass bei Stein 4 die höchsten Werte gemessen wurden. Einmal mehr ist der Parameter `a_mean_ungefiltert` eine Ausnahme, denn bei diesem stammt der höchste Wert aus den Messungen von Stein 1 (Tabelle 19). Somit hat bei dieser Auswertung der Stein mit der grössten Asymmetrie die höchsten Werte erreicht.

Tabelle 19: Durchschnittliche Beschleunigungen der einzelnen Steine mit den Ausreissern.

Parameter	Stein 1	Stein2	Stein 4
<code>a_max_gefiltert</code> [g]	11.8	11.8	14.4
<code>a_max_ungefiltert</code> [g]	1.8	1.8	2.1
<code>a_mean_gefiltert</code> [g]	20.6	20.4	23.6
<code>a_mean_ungefiltert</code> [g]	5.6	5.2	5.4

In Tabelle 20 sind die gleichen Werte ohne den Ausreissern aufgelistet. Auch hier weist Stein 4 die höchsten Werte auf. Ebenfalls wurden bei `a_mean_ungefiltert` von Stein 1 durchschnittlich die grössten Beschleunigungen gemessen wurden. Einziger Unterschied sind die tieferen Werte, was auf die Elimination der höchsten Spitzengeschwindigkeiten zurückzuführen ist. Daher sind es vor allem die beiden `a_max` Parameter, welche die grösseren Unterschiede in den Werten haben. Bei den Daten mit Ausreissern, sowie auch bei jenen ohne, weist Stein 2 mit Ausnahme von `a_max_gefiltert` ohne den Ausreissern die gleich hohen oder leicht tieferen Werte als Stein 1 auf.

Tabelle 20: Durchschnittliche Beschleunigungen der einzelnen Steine ohne den Ausreissern.

Parameter	Stein 1	Stein2	Stein 4
<code>a_max_gefiltert</code> [g]	8.2	8.3	9.4
<code>a_max_ungefiltert</code> [g]	1.6	1.6	1.9
<code>a_mean_gefiltert</code> [g]	16.9	16.8	18.4
<code>a_mean_ungefiltert</code> [g]	5.5	5.1	5.3

4.2.7 Einfluss der Flugzeit auf die Beschleunigung

Haben längere Flugphasen einen Einfluss auf die maximale und durchschnittliche Beschleunigung?

In einem ersten Schritt wurde mit dem Shapiro-Wilk-Test untersucht, ob bei der Dauer der Flugphasen sowie der Einschläge selber, Normalverteilungen vorliegen. Es lagen dabei weder bei den Daten mit den Ausreissern, noch bei jenen ohne, Normalverteilungen vor (p-Werte immer $< 2.2 \cdot 10^{-16}$).

Für eine bessere Übersicht und Lesbarkeit werden in diesem und den folgenden Kapiteln grundsätzlich nur die Diagramme der Parameter `a_max_gefiltert` und `a_mean_gefiltert` mit und ohne Ausreisser präsentiert. Die Diagramme der anderen Parameter sind im Anhang F zu finden.

In der folgenden Abbildung 21 ist die maximale gefilterte Beschleunigung, mit den Ausreissern, in Abhängigkeit der Zeit der vorangegangenen Flugphase, dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass die Dauer des Sprunges keinen klar ersichtlichen Einfluss auf die Beschleunigung hat. Zwar sind die beiden höchsten Beschleunigungen (498 g und 408 g) nach einem Sprung von über einer Sekunde (genau 1.039 s und 1.204 s), aber die zehn, mit den längsten vorangegangenen Flugphasen (allesamt über 1.278 s), weisen Beschleunigungsspitzen von maximal 35 g auf.

Die fünf nächstgrösseren maximalen Beschleunigungen (> 250 g und < 385 g) bewegen sich im Bereich von einer Flugphase von 0.021 s bis 0.763 s.

Der grösste Teil der restlichen Einschläge bewegen sich zwischen 0 g und 30 g sowie einer Flugphase von 0.03 s und 0.6 s.

Von den längsten zehn Flugphasen wurden sechs bei Stein 1 gemessen, zwei bei Stein 2 und zwei Stein 4.

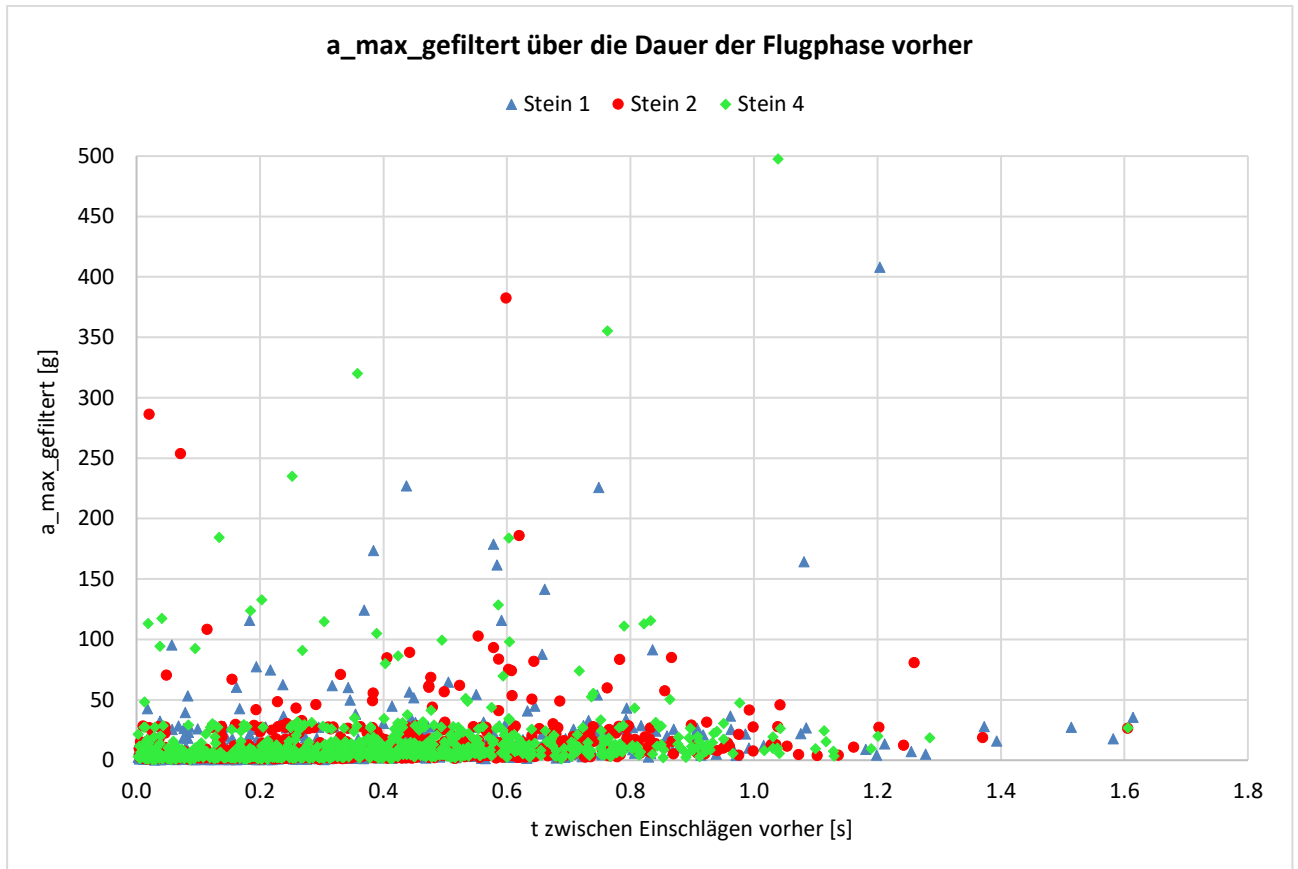


Abbildung 21: Abhängigkeit von $a_{\text{max_gefiltert}}$ von der Dauer zwischen den Einschlägen mit den Ausreissern.

Auch bei den gefilterten Maxima ohne den Ausreissern ist kein klarer Zusammenhang ersichtlich (Abbildung 22). Denn 21 der 22 höchsten Beschleunigungen (>40 g) liegen im Bereich von 0.013 s und 0.993 s. Jene Einschläge mit den längsten vorhergegangenen Flugphasen (zwischen 1.514 s und 1.614 s) erreichen lediglich Spitzen von 17 g bis 36 g. Sowie bei den Daten der a_{max} mit den Ausreissern hat auch hier die Mehrheit der Einschläge eine vorangegangene Flugphase von 0.03 und 0.6 s. Die Beschleunigungen liegen in einem Bereich von 0 g bis 10 g.

Abgesehen von den längsten Flugphasen sind die restlichen Werte sehr ausgeglichen auf die drei Steine verteilt. Dies bestätigt auch die Verteilung der Ausreisser auf die drei Steine. Wie bereits in Kapitel 0 beschrieben sind davon 26 von Stein 1 und je 29 von Stein 2 und Stein 4.

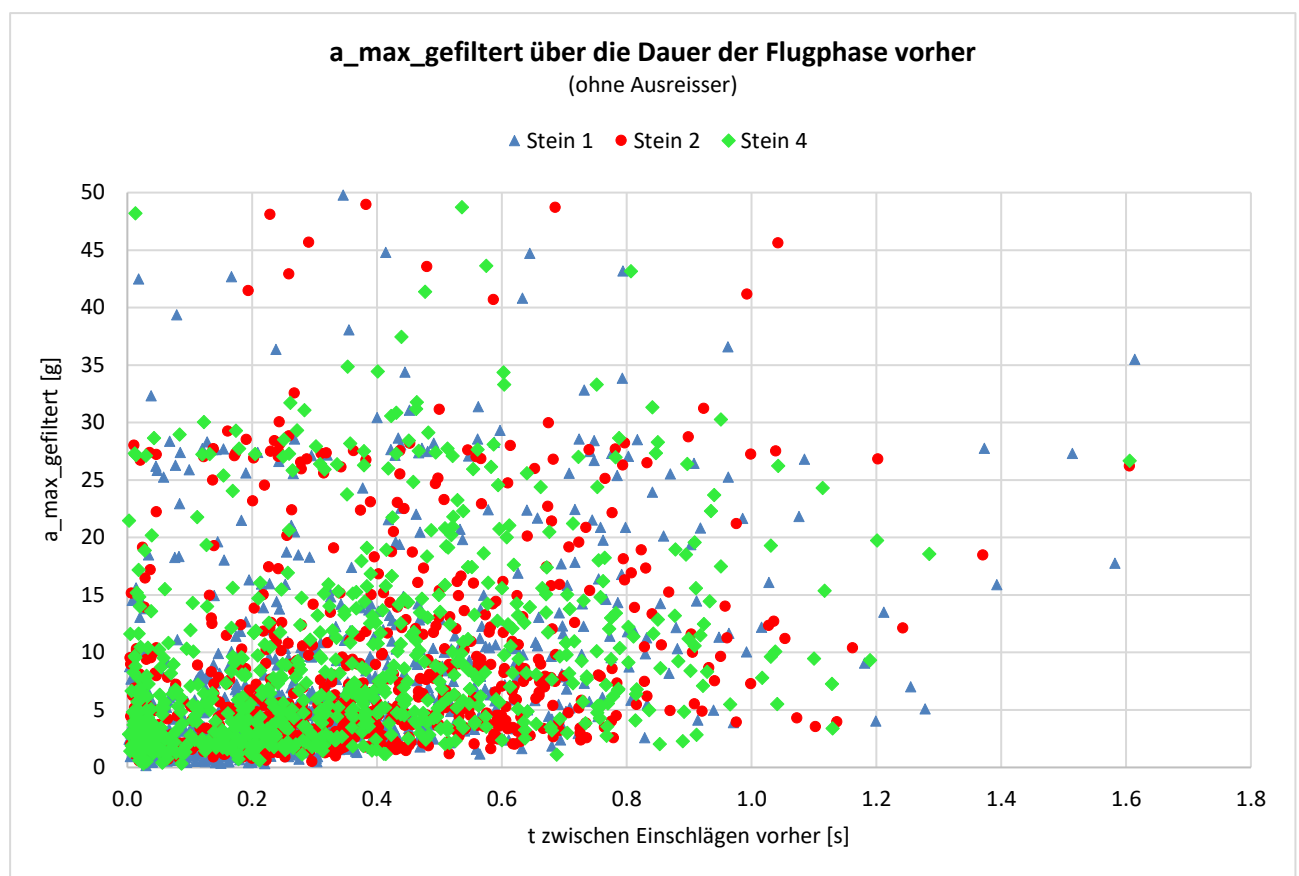


Abbildung 22: Abhängigkeit von $a_{\text{max_gefiltert}}$ von der Dauer zwischen den Einschlägen ohne Ausreisser.

Wie bei den Maxima ist auch bei den durchschnittlichen Beschleunigungen, mit oder ohne Ausreisser, kein Trend erkennbar (Abbildung 23 und Abbildung 24). Mit Ausnahme der tieferen Beschleunigungen wiederholt sich das Bild auch bei diesen Vergleichen. Auf die längsten Sprünge folgen weder die geringsten noch die höchsten Beschleunigungen. Einzig etwas auffällig ist, dass zwei der drei höchsten Beschleunigungen der $a_mean_gefiltert$ ohne Ausreisser eine sehr kurze Flugphase von lediglich 0.012 s und 0.013 s aufweisen und alle drei bei einem Versuch mit dem Stein 4 gemessen wurden.

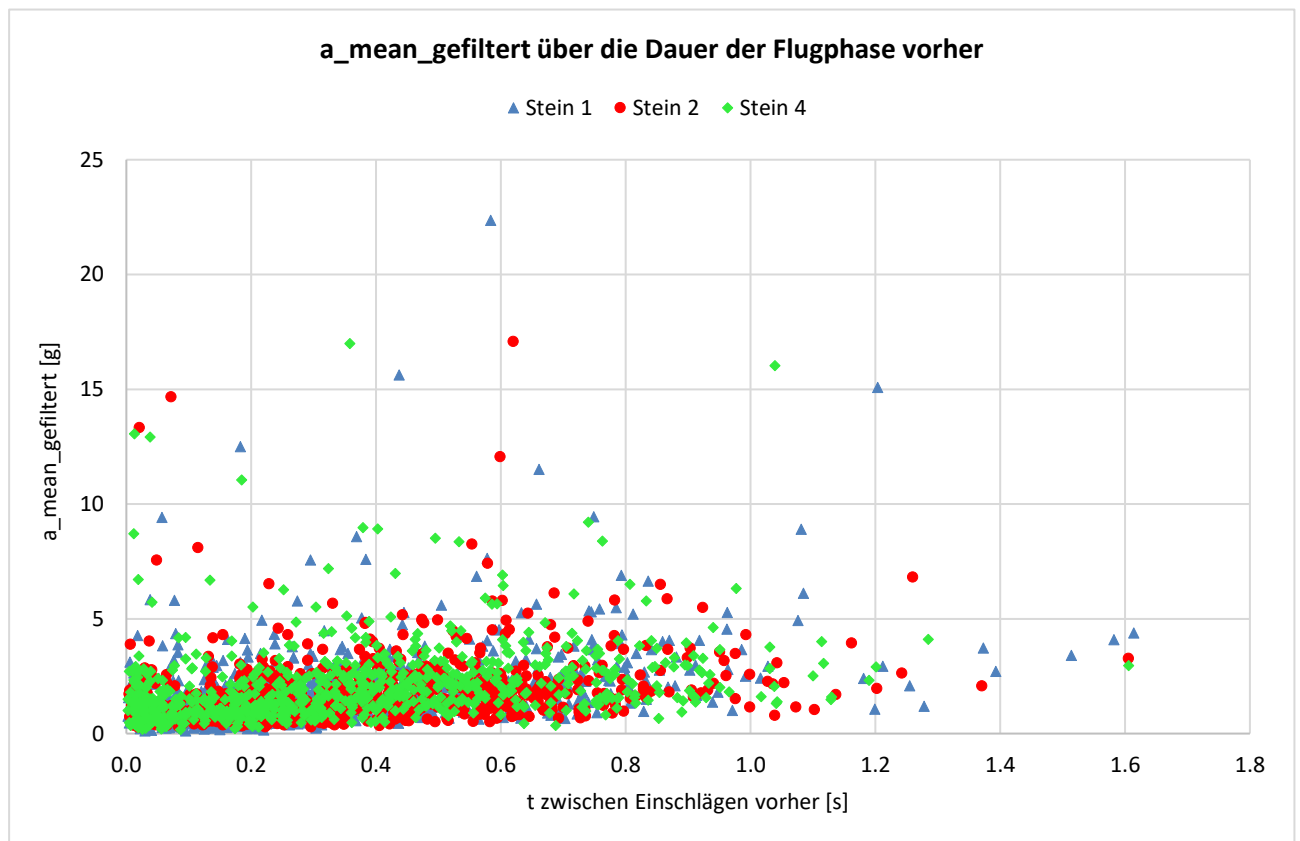


Abbildung 23: Abhängigkeit von $a_mean_gefiltert$ von der Dauer zwischen den Einschlägen mit den Ausreissern.

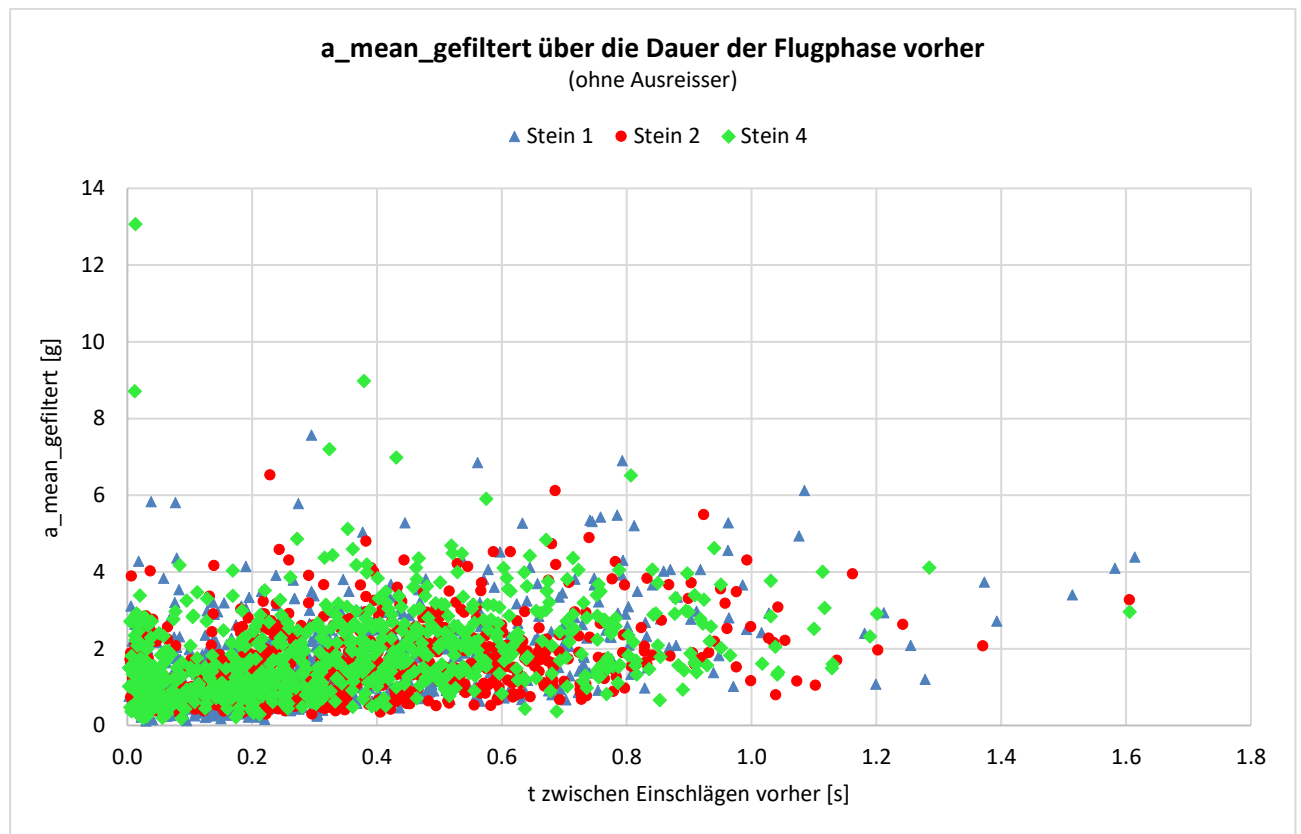


Abbildung 24: Abhängigkeit von $a_{\text{mean_gefiltert}}$ von der Dauer zwischen den Einschlägen ohne Ausreisser.

4.2.8 Einfluss der Dauer des Einschlages auf die Beschleunigung

In diesem Kapitel wurde die Dauer eines Einschlages und dessen Auswirkung auf die Beschleunigung geprüft. Dabei wurden zuerst die Werte der Einschlagsdauer auf eine Normalverteilung getestet. Mit dem p-Wert von $<2.2e-16$ für mit und ohne den Ausreissern besteht bei beiden keine Normalverteilung. Nachfolgend werden die Daten zu dieser Frage visualisiert.

In Abbildung 25 werden $a_{\text{max_gefiltert}}$ und die Einschlagsdauer mit den Ausreissern gegenübergestellt. Der Grossteil der Einschläge dauerte zwischen 0.010 s und 0.260 s. Nur vier Einschläge hatten eine längere Einschlagsdauer, welche aber Beschleunigungen von lediglich maximal 28 g erreichten. Der längste dauerte 0.534 s.

Die fünf höchsten Beschleunigungen ($a > 300$ g) wurden bei einer Einschlagsdauer von 0.113 s und 0.191 s gemessen. Die höchste von 498 g (Stein 4) wurde bei einer Einschlagsdauer von 0.128 s erreicht. Gut sichtbar ist, dass der längste Einschlag von Stein 4 (0.260 s) einiges kürzer als jene von Stein 1 (0.408 s) und Stein 2 (0.534 s) ist. Allerdings haben Stein 1 und Stein 2 nur je zwei

Einschläge welche länger sind als der längste von Stein 4. Davon dauerten jene zwei von Stein 2 länger als jene von Stein 1.

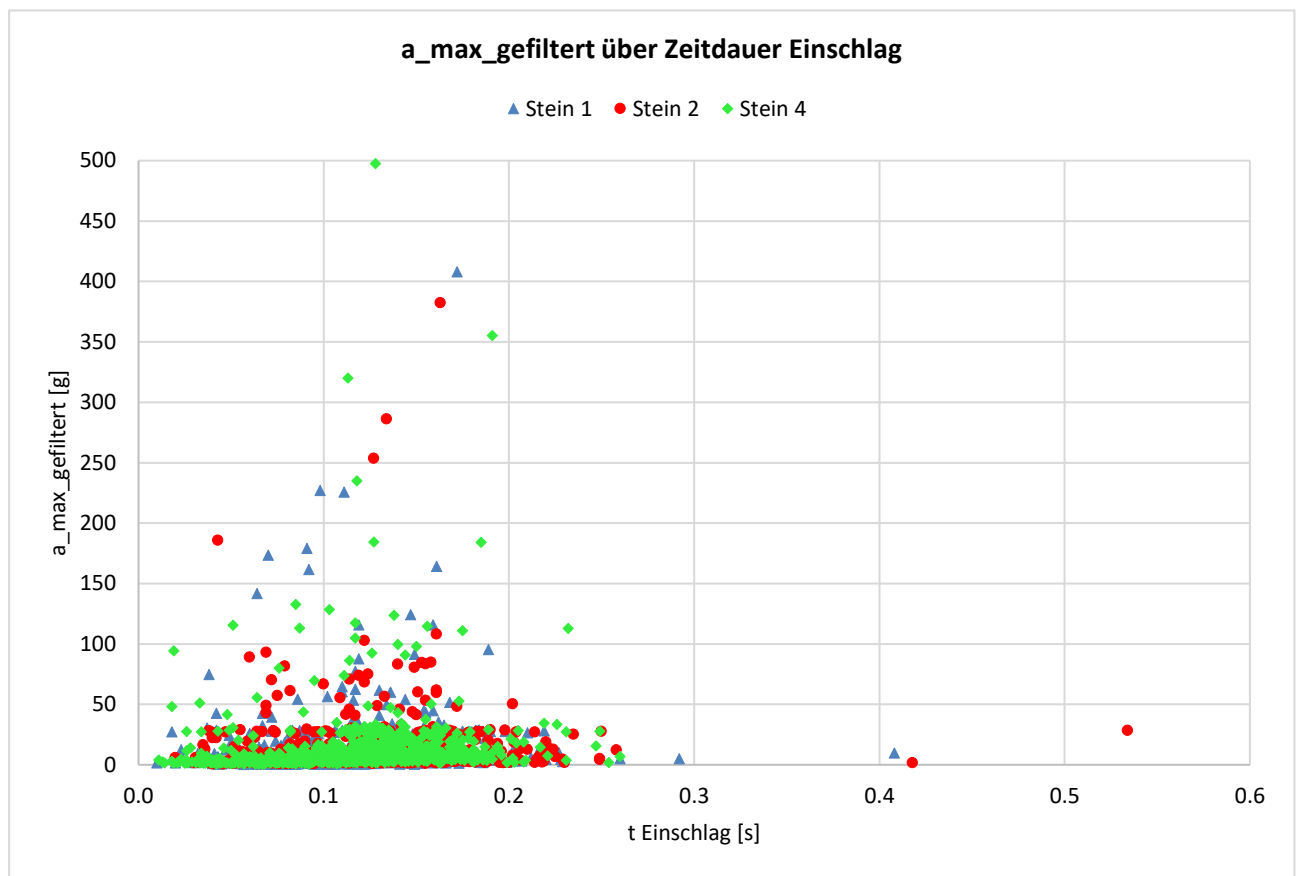


Abbildung 25: Gegenüberstellung von der Dauer der Einschläge und a_max_gefiltert mit den Ausreissern.

Bei der Gegenüberstellung derselben Daten ohne die Ausreisser zeigt sich, abgesehen von tieferen Beschleunigungsspitzen, ein ähnliches Bild (Abbildung 26). Die längsten Einschlagsdauern erreichten keine speziell hohen Beschleunigungen. Und auch die höchsten Beschleunigungen wurden bei Einschlägen zwischen 0.018 s und 0.172 s gemessen.

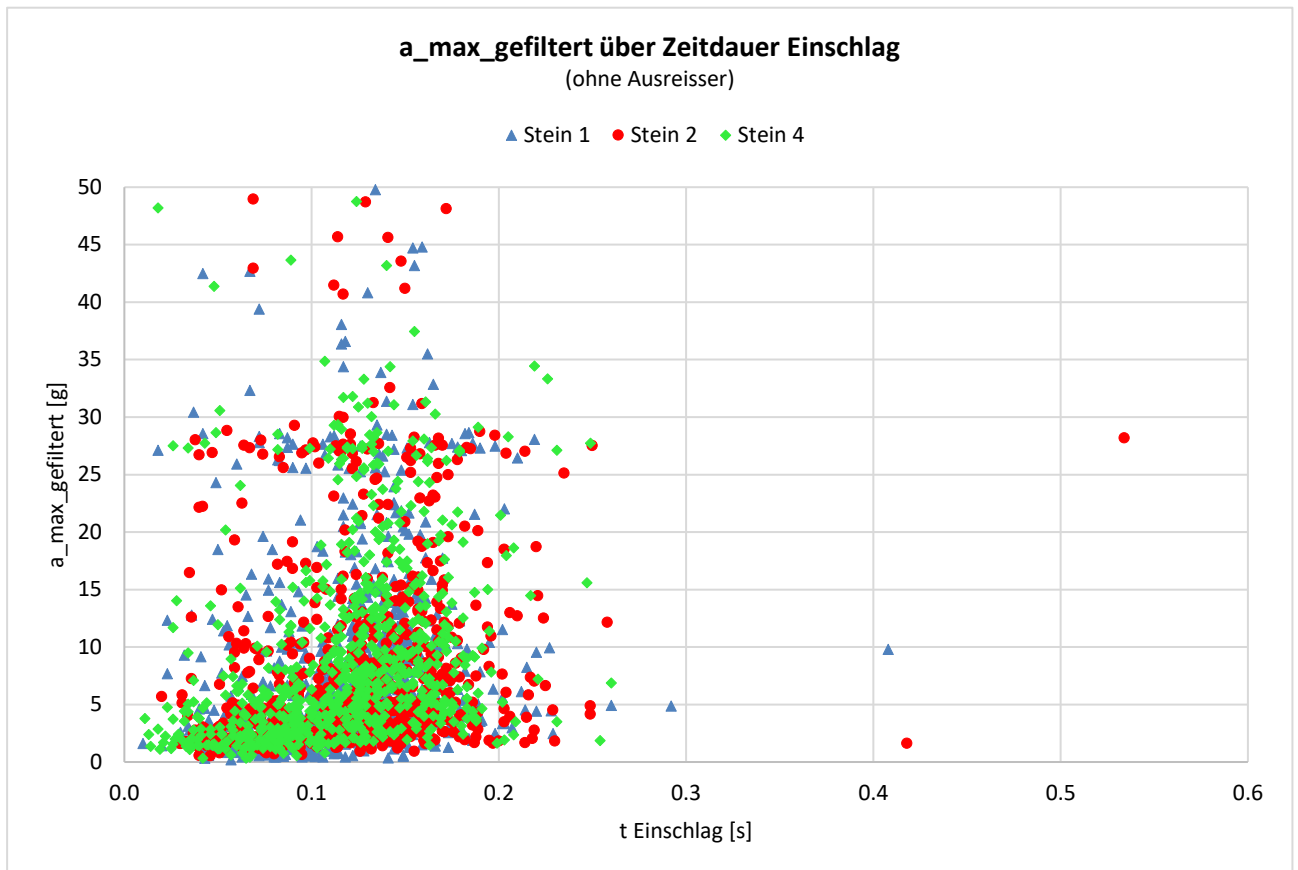


Abbildung 26: Gegenüberstellung von der Dauer der Einschläge und $a_{\text{max_gefiltert}}$ ohne Ausreisser.

Die Gegenüberstellung der $a_{\text{mean_gefiltert}}$ mit den Ausreißern und der Einschlagsdauer (Abbildung 27) zeigt wiederum, dass keine der Werte gehören zu beiden extremen gleichzeitig.

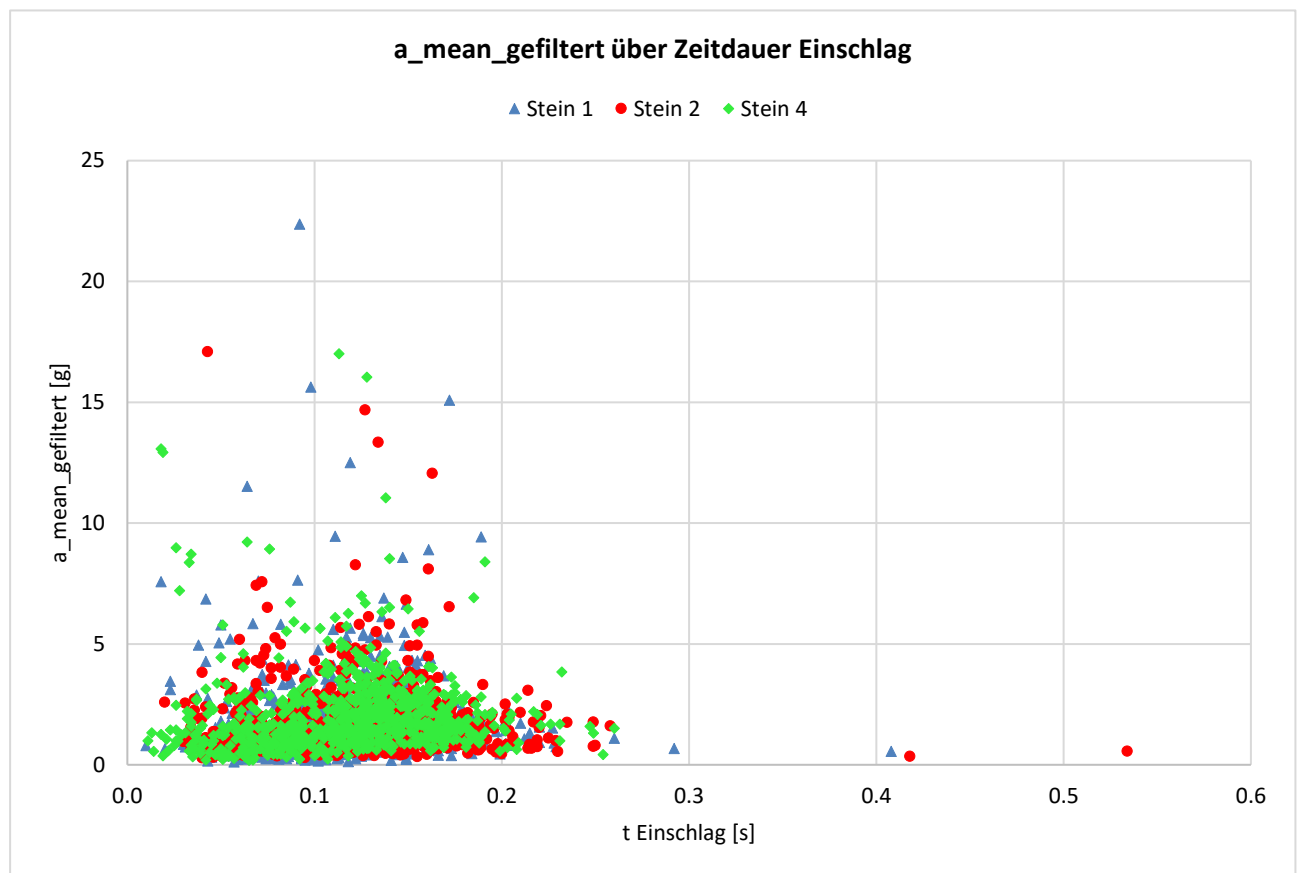


Abbildung 27: Gegenüberstellung von der Dauer der Einschläge und $a_{\text{mean_gefiltert}}$ mit den Ausreißern.

Auf der Abbildung 28 sind die $a_{\text{mean_gefiltert}}$ ohne Ausreißer der Einschlagsdauer gegenübergestellt. Dabei ist ersichtlich, dass die höchsten fünf Beschleunigungsdurchschnitte bei sehr kurzen Einschlagsdauern von weniger als 0.034 s gemessen wurden. Vier dieser fünf Messungen wurden mit dem Stein 4 gemessen. Die fünfte mit Stein 1. Diese Zeiten gehören zu den kürzesten 43 Einschlägen überhaupt. Gesamthaft sind ohne die Ausreißer 2223 Einschläge gemessen worden. Allerdings ist dieses Phänomen nur bei den $a_{\text{mean_gefiltert}}$ erkennbar. Bei den $a_{\text{mean_ungefiltert}}$ ist davon nichts zu erkennen (Abbildung 29).

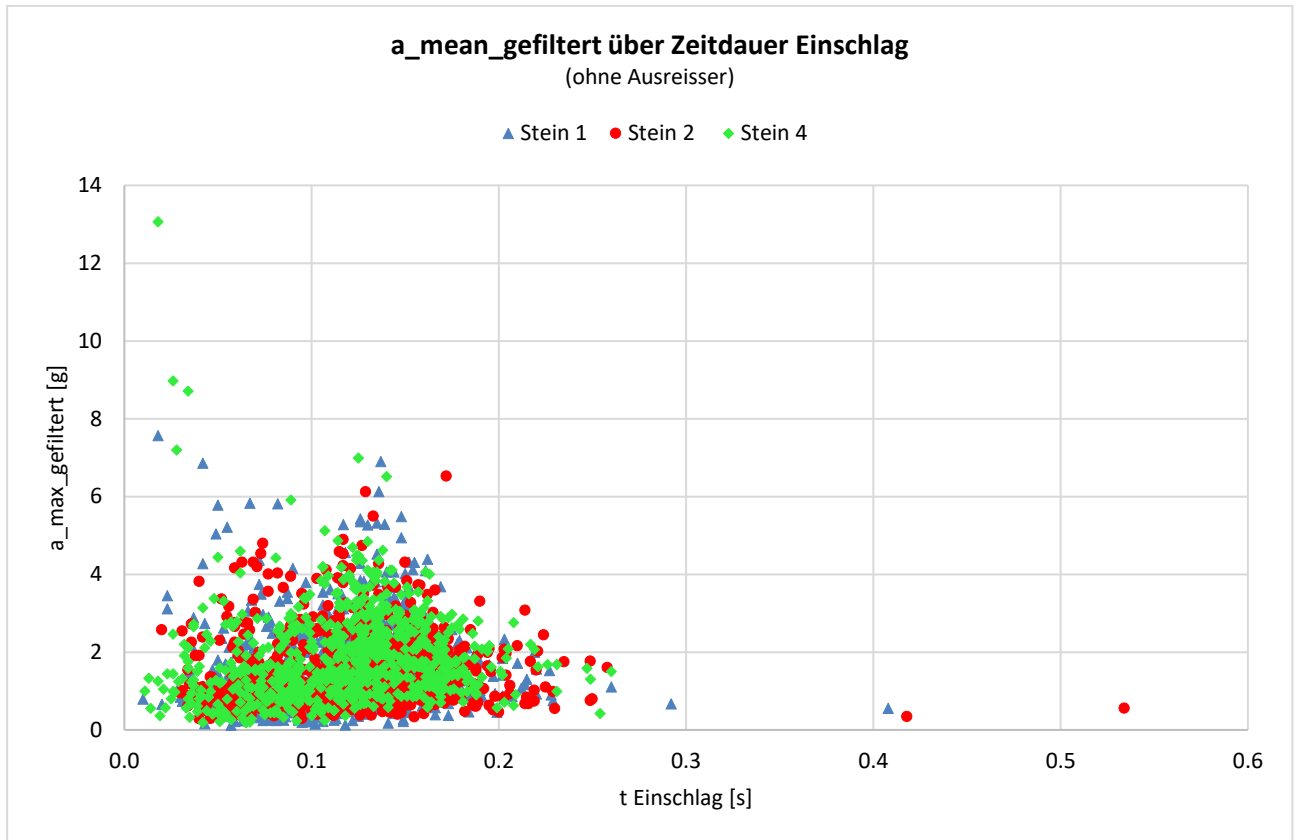


Abbildung 28: Gegenüberstellung von der Dauer der Einschläge und a_mean_gefiltert ohne Ausreisser.

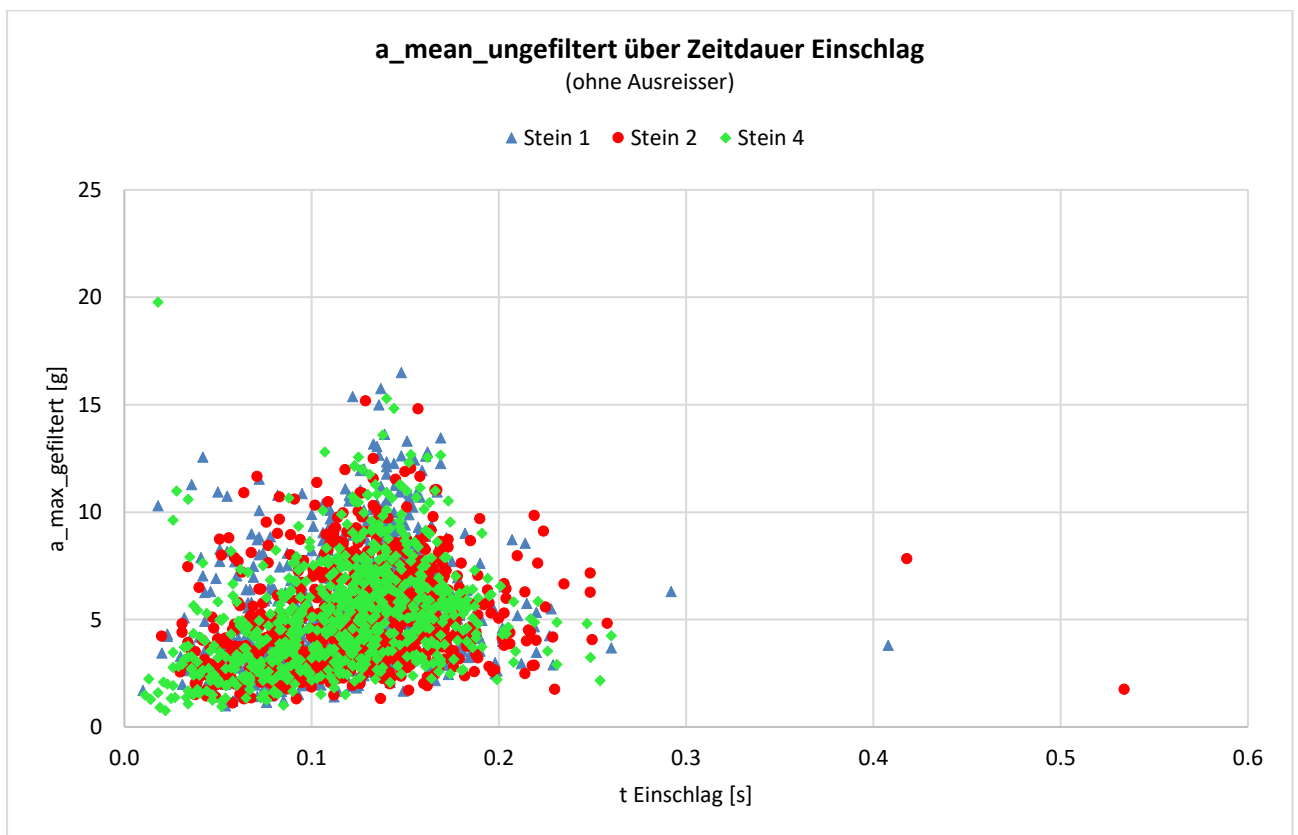


Abbildung 29: Gegenüberstellung von der Dauer der Einschläge und a_mean_ungefiltert ohne Ausreisser.

Die restlichen Diagramme der ungefilterten Daten sind in Anhang G ersichtlich.

4.3 Einfluss der vorgegangenen Flugphase auf die Dauer des Einschlages

Auf Abbildung 30 und auf Abbildung 31 ist gut erkennbar, dass die Einschläge, welche auf lange Flugphasen von über 1 s folgten, sich von der Dauer her zwar im oberen Mittelfeld befinden, verhältnismässig aber nicht speziell lange dauerten. Jene drei Einschläge, welche am längsten dauerten, hatten eine vorangegangene Flugphase von 0.453 s, 0.406 s und 0.408 s. Diese Flugphasen bewegen sich im Mittelfeld und weisen keine weiteren Extreme mehr auf. Die beiden längsten dieser drei Einschläge wurden mit dem Stein 2 gemessen. Der Dritte mit Stein 1.

Es zeigt sich, dass je länger die vorhergehende Flugphase ist, desto länger dauern die kürzesten Einschläge.

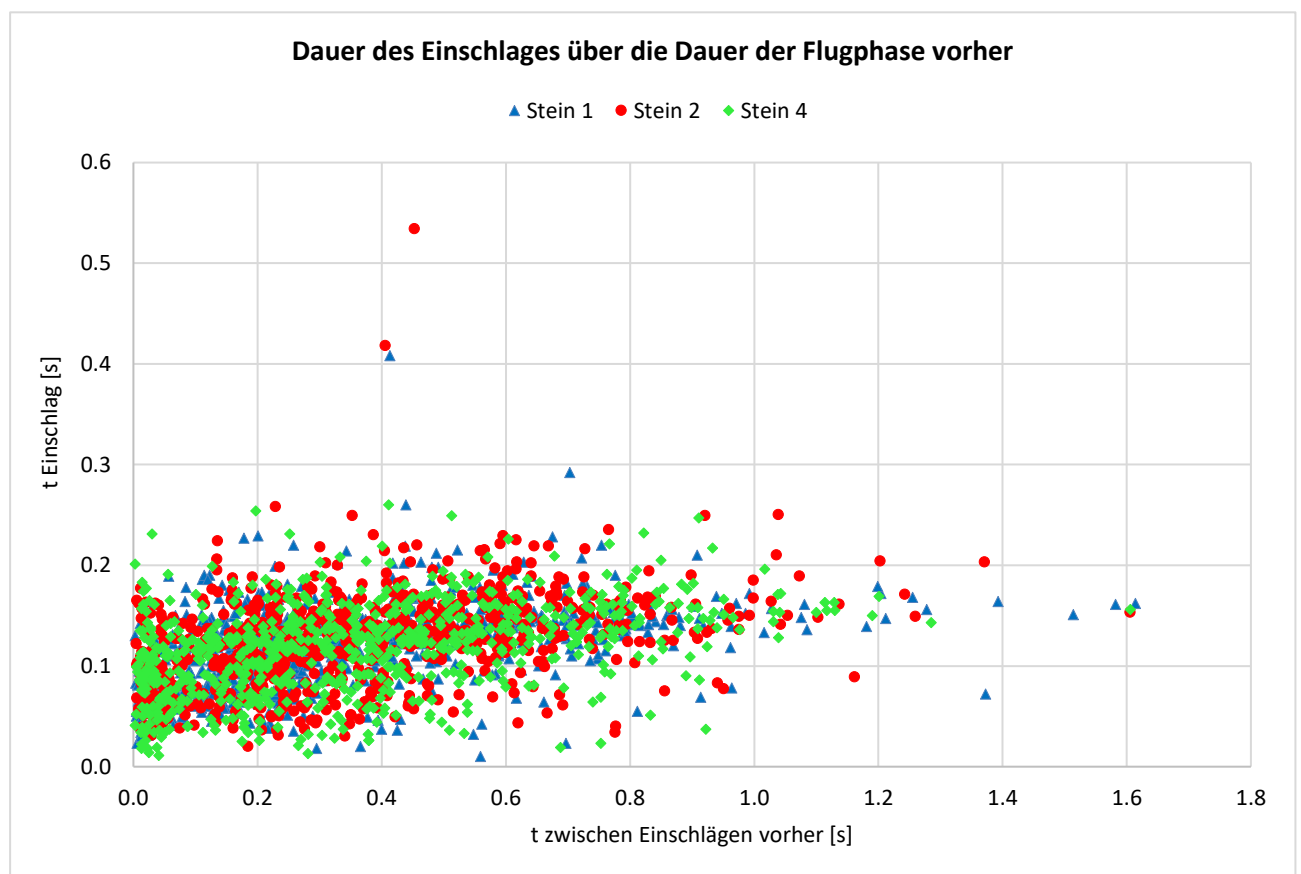


Abbildung 30: Gegenüberstellung der Dauer des Einschlages und der Dauer der Flugphase vor dem Einschlag mit Ausreissern.

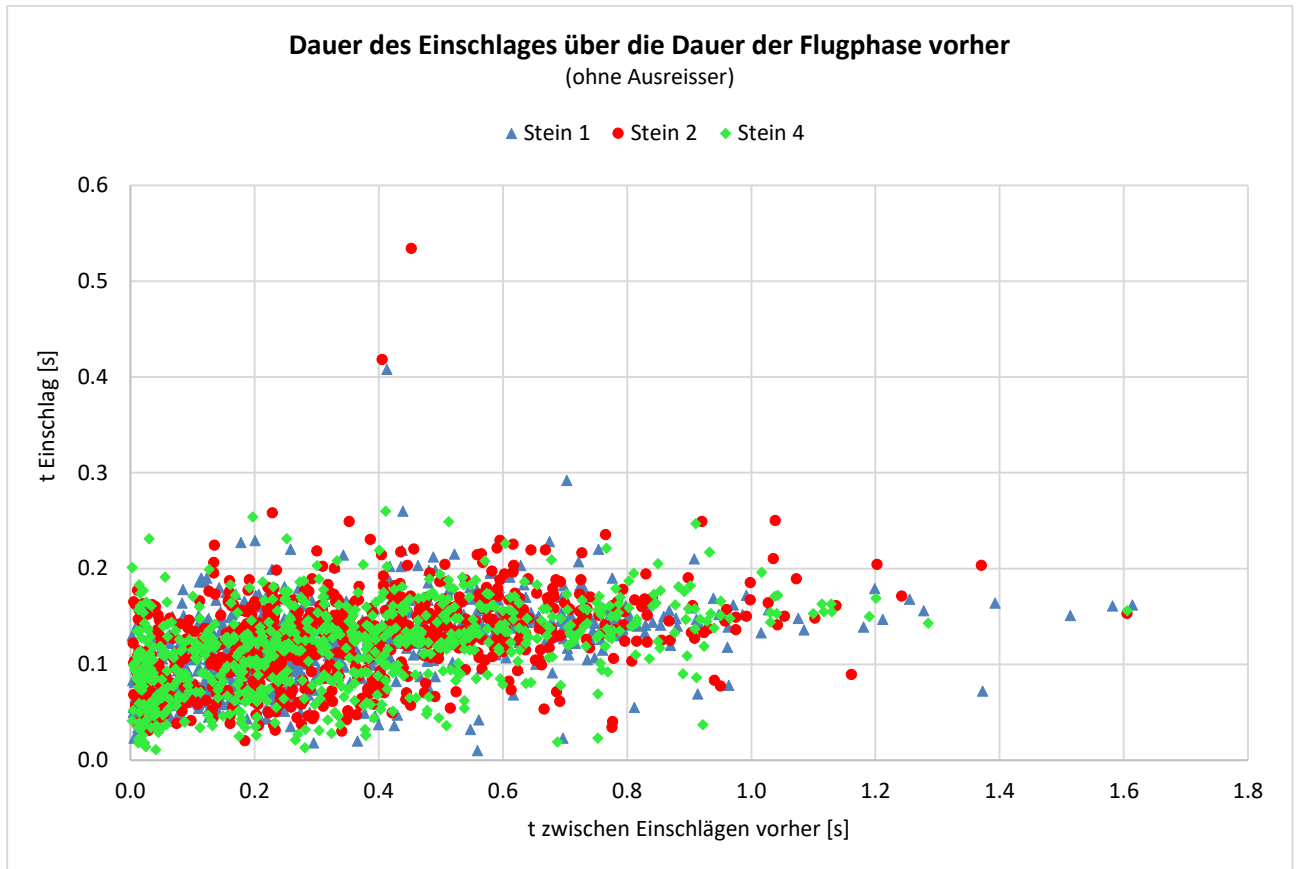


Abbildung 31: Gegenüberstellung der Dauer des Einschlages und der Dauer der Flugphase vor dem Einschlag ohne Ausreisser.

4.4 Besonderheiten

4.4.1 Doppeleinschlag

Wie bereits in Kapitel 3.6 beschrieben, sind während den Auswertungen Situationen von Doppeleinschlägen aufgetaucht. Zuerst wurden diese als Mutliimpacts klassiert Diese hätten, bedingt durch die lange Einschlagszeit die Resultate, verfälscht. Deshalb wurde entschieden, dass sie in einzelne Einschläge zu unterteilen sind. Begründet wurde dies damit, dass die Distanz welche der Stein in dieser Zeit zurücklegt, ebenfalls als Sprung gewertet werden kann. Bei Simulationen wird von einer durchschnittlichen Geschwindigkeit des Steines von 10 m/s ausgegangen (mündliche Mitteilung von A. Volkwein). Rechnet man mit der Sprungdauer von 0.018 s aus dem Beispiel von Kapitel 3.6, ergibt dies eine Sprungdistanz von 18 cm (Abbildung 32).

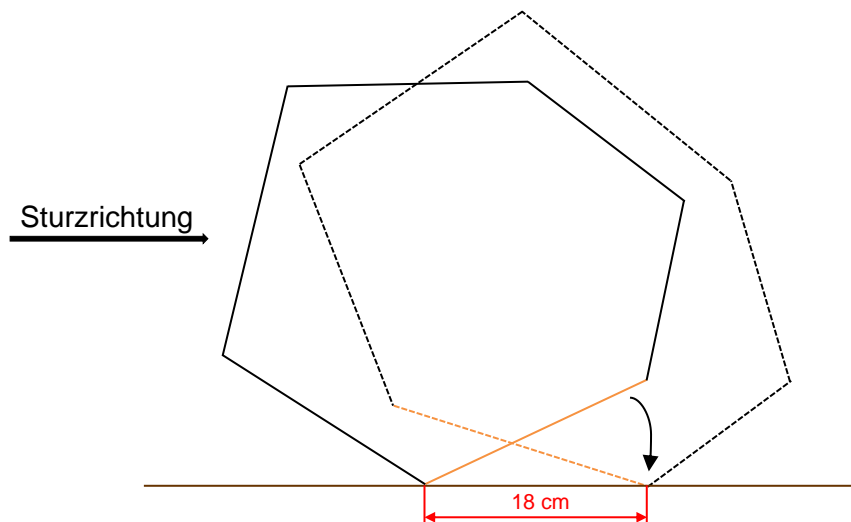


Abbildung 32: Veranschaulichung eines Doppeleinschlages (aus dem Beispiel von Kapitel 3.6). Ausgezogene Linie: 1. Einschlag; gestrichelte Linie: 2. Einschlag.

Insgesamt gab es ungefähr 110 solche Doppeleinschläge.

4.4.2 Buschkontakt

Da auf dem Versuchshang Büsche wuchsen und der Startpunkt b sich gerade oberhalb eines solchen befand, kam es vor, dass Steine durch dessen Äste gesprungen waren. Dies war im Diagramm sehr gut zu sehen, da sich die Rotation durch den Kontakt leicht veränderte. Durch die Störung des normalen Musters der Flugphasen, war auch bei den Daten des Beschleunigungssensors ein solcher Kontakt sichtbar (Abbildung 33).

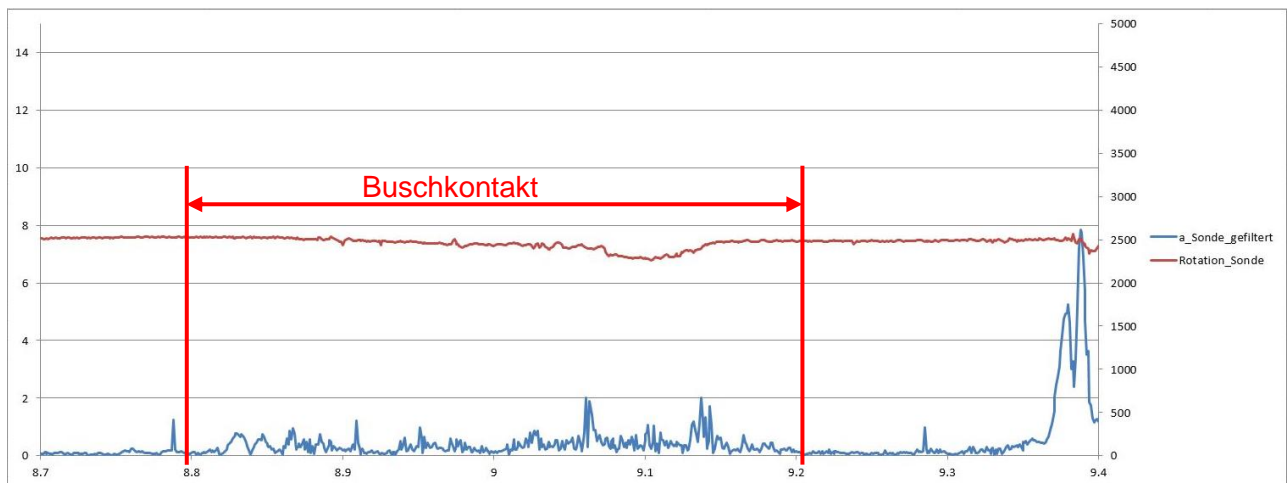


Abbildung 33: Diagrammausschnitt eines Buschkontaktes.

In solchen Fällen wurden, zur sicheren Identifikation eines Buschkontaktes, die Bilder der Hochgeschwindigkeitskamera konsultiert. Auf diesen war der Kontakt eindeutig und gut sichtbar (Abbildung 34).

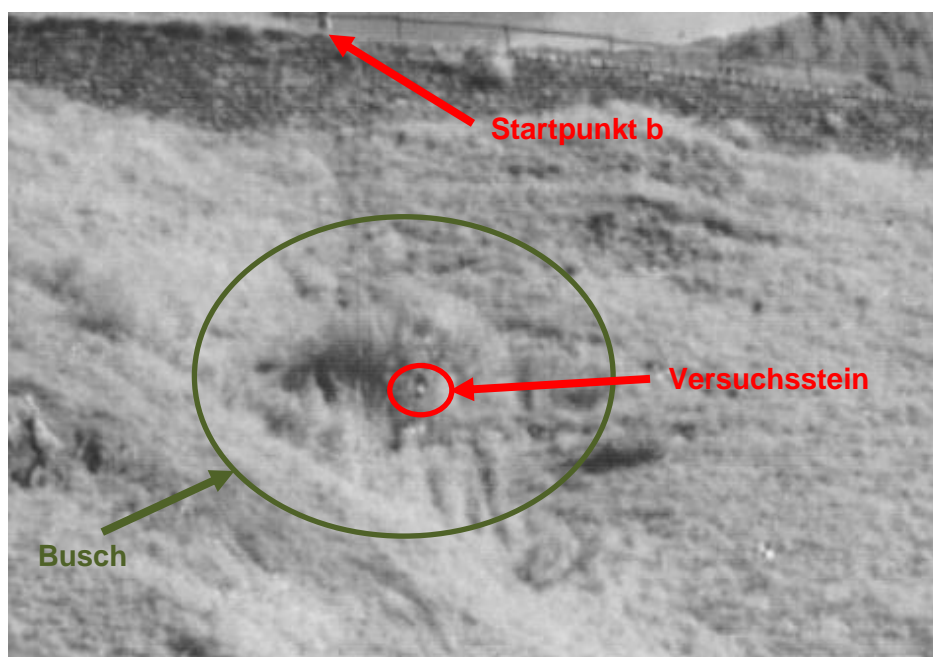


Abbildung 34: Videostandbild von der Hangsituation mit Busch, Startpunkt b und einem Versuchsstein.

4.4.3 Rollphasen

Im Verlaufe des Versuches 057 gab es während des Sturzes eine Rollphase. Diese wurde daran erkannt, dass die Rotationsdaten weder das typische Muster eines Einschlages, noch jenes eines Buschkontaktes anzeigen. Zudem schlug die Beschleunigungssonde in derselben Zeitspanne ebenfalls aus (Abbildung 35). Eine Verifikation mittels Videoanalyse war in diesem Falle nicht möglich, da sich der Stein zu diesem Zeitpunkt bereits ausserhalb des Kamerafeldes befunden hatte.

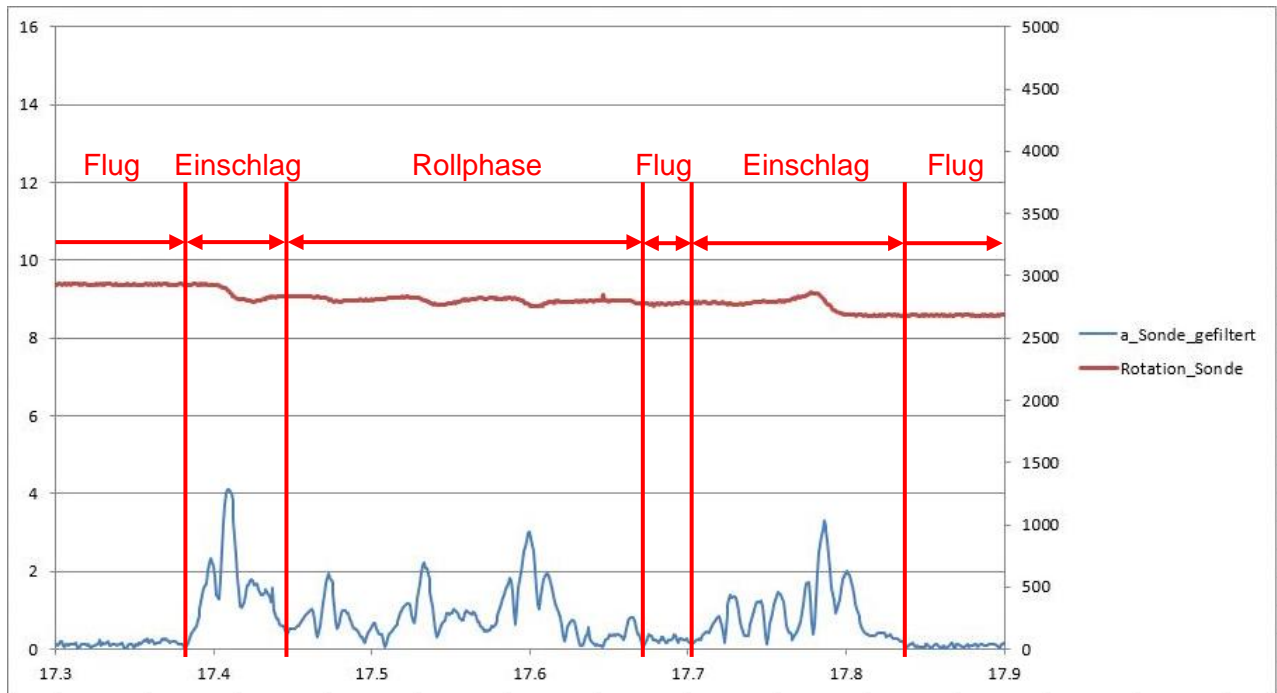


Abbildung 35: Rollphase während des Sturzes bei Versuch 057.

5 Diskussion

Vergleichbare Versuche wie jene von 2014 am Oberalppass hat es bisher noch keine gegeben. Aus diesem Grund können Arbeit die Ergebnisse dieser Arbeit nur mit jenen von Sutter (2017) (Semesterarbeit und Vorstudie) verglichen werden.

5.1 Horizontale Reichweite der Steine

Ob generalisiert über alle Versuche gesehen oder aufgeteilt in die einzelnen Startpunkte und Steine, zeigt sich eindeutig, dass Stein 1 die höchste durchschnittliche horizontale Reichweite aufweist. Auch zeigt sich deutlich, dass Stein 4 von allen Startpunkten aus die kleinste durchschnittliche Reichweite aufweist. Ebenso verhält es sich mit der Anzahl Einschläge pro Sturz. Auch wenn die Unterschiede in diesem Punkt nicht so gross sind wie bei der horizontalen Reichweite, so sind im Durchschnitt bei Stein 1 auch die meisten Einschläge verzeichnet worden, die wenigsten bei Stein 4. Die Werte von Stein 2 bewegen sich mehr oder weniger in der Mitte der anderen beiden Steine.

Die Vermutung aus Sutter (2017), dass die Form und nicht das Gewicht ausschlaggebend für die Reichweite und Anzahl der Einschläge ist, kann hiermit bestätigt werden. In Sutter (2017) sind zwar lediglich zehn Versuche ohne Einbezug der unterschiedlichen Startpunkte ausgewertet worden. Die Erkenntnisse aus jenen Resultaten sind im Endeffekt aber mit den Vorliegenden vergleichbar.

Trotz den unterschiedlichen Startpunkten liegen die durchschnittlichen horizontalen Reichweiten ziemlich nahe beisammen. Dies hängt mit grosser Wahrscheinlichkeit damit zusammen, dass der Versuchshang zwar von der Geländeform her unterschiedlich, die Bodenbeschaffenheit aber überall gleich war. Für die Auswertung wie die Steine sich zueinander verhalten ist diese Art von Hang optimal. Eine Übertragung auf einen steinigen oder felsigen Hang ist jedoch nicht direkt möglich.

5.2 Beschleunigungen

Die Frage, ob es besser gewesen wäre anstelle des Mittelwertes den Median zu ermitteln, kam zu spät auf. Zu diesem Zeitpunkt war die Arbeit bereits zu weit fortgeschritten um auch noch den Median mit ein zu beziehen. Im Nachhinein gesehen, wäre der Median vermutlich die bessere Wahl gewesen, da hohe Messungen nicht so sehr ins Gewicht fallen wie beim Mittelwert. Bei den a_{mean} Parametern hätte es allerdings keine allzu grossen Abweichungen gegeben. Der Vorteil beim Auswerten mit dem Median wäre gewesen, dass dadurch die Parameter "ohne Ausreisser" nicht mehr nötig gewesen wären, da diese nur einen kaum erkennbaren Einfluss haben.

Bei Sutter (2017) wurde allerdings mit dem Mittelwert gearbeitet, was bei einer Auswertung mit dem Median bedeutet hätte, dass ein direkter Vergleich der Resultate nicht möglich gewesen wäre.

5.2.1 Ausreisser

Ausreisser zu definieren und nicht zu berücksichtigen ist heikel, da so Daten wegfallen könnten welche eigentlich korrekt sind, aber nicht ins Bild passen. Um die Resultate mit jenen von Sutter (2017) vergleichen zu können, wurden die gleichen Definitionen festgelegt. Zudem kann gesagt werden, dass bei einer Datenmenge von 2307 Einschlügen die 84 als Ausreisser definierten Einschlüge bei der Auswertung nicht allzu sehr ins Gewicht fallen dürften.

5.2.2 Gefiltert und ungefiltert

Der Einfluss des Filters auf die Daten war sehr unterschiedlich. Bei den a_{\max} mit den Originaldaten, das heisst mit den Ausreissern, wurden die Beschleunigungsdaten nur minim verändert. Wobei mit der Filterung bei den a_{mean} ohne den Ausreissern eine sehr grosse Veränderung der Werte vorgenommen wurde.

Eine Verbesserung des R^2 -Werts konnte mit der Umwandlung der Regressionsgeraden in eine Parabel 2. Grades erreicht werden. Dies brachte beim Parameter a_{mean} mit den Ausreissern eine deutliche Verbesserung. Bei den restlichen war die Veränderung nur minim. Weil durch die Erhöhung des Exponenten der Regressionskurve die Ungenauigkeit steigt, macht es keinen Sinn höher zu gehen um eine noch besseren R^2 -Wert zu erreichen. Aufgrund der starken Verbesserung von a_{mean} , empfiehlt es sich, falls mit diesen Daten gerechnet werden soll, dies mit der quadratischen Regression zu tun. Denn die Berechnungen aller Parameter müssen mit dem gleichen Faktor gerechnet werden.

Auf die Auswertungen in dieser Arbeit hatte das Filtern als solches allerdings keinen direkten Einfluss, da die Daten bereits von Kummer (2015) gefiltert worden sind.

5.2.3 Normalverteilungen

Aufgrund der Resultate in Sutter (2017) die besagen, dass die Beschleunigungsdaten keiner Normalverteilung folgen, war zu erwarten, dass es in dieser Arbeit nicht anders sein wird. Dies wurde mit sehr tiefen p-Werten des Shapiro-Wilk-Tests bestätigt. Und hat Gültigkeit für alle der vier Parameter, unabhängig ob mit oder ohne Ausreisser.

5.2.4 Ähnlichkeiten der Beschleunigungsverteilung der einzelnen Steine

Mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test wurden die Ähnlichkeiten der Verteilung innerhalb der einzelnen Steine verglichen. Beim Vergleich zwischen Stein 1 und Stein 2 mit den Ausreissern stellte sich heraus, dass sich die Parameter $a_{\max_ungefiltert}$ und die beiden a_{mean} in der Verteilung ähnlich

sind. Einzig die Verteilung von `a_max_gefiltert` ist signifikant anders. Dies könnte auf die ähnliche Form dieser beiden Steine zurückzuführen sein, denn bei den Vergleichen von Stein 1 und Stein 4 sowie von Stein 2 und 4 ähneln sich lediglich die Verteilung von `a_mean_ungefiltert`. Dass bei `a_max_gefiltert` eine signifikante Ähnlichkeit nicht vorhanden ist und bei den Übrigen aber schon, wirft erste Fragen auf. Ebenso speziell ist, dass bei den anderen Vergleichen nur das `a_mean_ungefiltert` Ähnlichkeiten aufweist. In Sutter (2017), als nur zehn Versuche getestet wurden, gab es zusätzliche Ähnlichkeiten bei `a_max_gefiltert` von Stein 1 und Stein 2, sowie bei `a_mean_gefiltert` von Stein 1 und Stein 4 und bei `a_max_ungefiltert` von Stein 2 und Stein 4. Aber auch bereits dort gab es Ähnlichkeiten bei allen Vergleichen von Stein 1 und Stein 2 mit den Ausreissern. Ohne Ausreisser gab es bei Stein 1 zu Stein 2 keine Ähnlichkeit bei `a_mean_ungefiltert` sowie bei Stein 2 und Stein 4 bei `a_max_ungefiltert`.

Beim selben Test ohne den Ausreissern sehen die Resultate gleich aus. Bereits hier zeigt sich ein erstes Mal, dass das Herauslöschten der Ausreisser bei so einer grossen Datenmenge keinen grossen Einfluss hat.

5.2.5 Vergleich der Daten zwischen den einzelnen Steinen

Beim Kruskal-Wallis-Test wurde nach einer Antwort auf die Frage, ob die Beschleunigungen, unterteilt in die vier Parameter, über alle drei Steine gesehen Ähnlichkeiten aufweisen, gesucht. Ausser bei `a_mean_ungefiltert` bestehen keine Ähnlichkeiten. Wie bereits beim Kolmogorov-Smirnov-Test sind die Werte von diesem Parameter auffällig anders.

Für den Vergleich der Mediane der einzelnen Parameter und Steine wurde der Pairwise-Wilcoxon-Test verwendet. Wiederum weisen die Vergleiche von Stein 1 und Stein 2 eine Ähnlichkeit auf. Was die Vermutung auf den Einfluss der Form bestärkt. Sutter (2017) zeigt bei diesem Vergleich jedoch ein anderes Bild. Da wurden Ähnlichkeiten bei allen Vergleichen von Stein 2 und 4 nachgewiesen, während in dieser Arbeit zwischen diesen beiden Steinen ausser bei `a_mean_ungefiltert` keine Ähnlichkeiten gefunden wurden. Allerdings stellt sich die Frage wie aussagekräftig das Ergebnis von Sutter (2017) in diesem Falle ist, da dort nur 255 Einschläge analysiert wurden.

Und bereits zum dritten Mal, bei den Vergleichen der Beschleunigungen, weicht der Wert beim Vergleich von Stein 1 mit Stein 4 sowie von Stein 2 mit Stein 4 von `a_mean_ungefiltert` von den restlichen ab. Da bei keinem anderen Parameter bei den restlichen Vergleichen dieser Steine Ähnlichkeiten vorhanden sind. Und ebenfalls wie bei den vorherigen Tests gibt es bei den Daten ohne Ausreisser keine Unterschiede in den Resultaten.

Einen Grund für die Abweichung bei den statistischen Auswertungen von `a_mean_ungefiltert` konnte nicht gefunden werden. Eine anfängliche Vermutung, dass dies durch von den Ausreissern her rührt konnte nicht bestätigt werden, da bei den Auswertungen ohne den Ausreissern die gleichen Abweichungen auftauchen.

5.2.6 Vergleich der Beschleunigungen der einzelnen Steine

Beim Vergleich der durchschnittlichen Beschleunigungen zwischen den einzelnen Steinen zeigte sich, dass bei Stein 4 die höchsten Werte gemessen wurden. Wie bereits erwähnt ist dies der Stein mit der am meisten abgeplatteten Form. Dies alleine mit der Form des Steines zu begründen ist aber nicht möglich, denn Stein 1 der beinahe rund ist, weist die gleich hohen oder leicht höhere Werte als Stein 2, welcher weniger kugelförmig ist, auf.

Zu untersuchen wäre hier auch ob das Gewichte ebenfalls einen Einfluss auf die Beschleunigung hat, denn Stein 4 ist mit 40.3kg mit Abstand der leichteste der dreien. Stein 1 hat eine Masse von 68.7kg und Stein 2 von 78.7kg. Beim schwersten Stein ergaben die Messungen meistens die tiefsten Werte während beim leichtesten die höchsten Beschleunigungen gemessen wurden. Aufgrund der Berechnung für die Beschleunigung (Formel 1) war dies zu erwarten.

Formel 1: Formel für die Berechnung von der Kraft F zwischen Boden und Stein sowie der Beschleunigung a des Steines.

$$F = m * a \qquad a = \frac{F}{m}$$

Denn je grösser die Masse (m) eines Steines desto kleiner wird die Beschleunigung.

5.2.7 Einfluss der Flugzeit auf die Beschleunigung

Dass sechs der zehn längsten Flugzeiten bei Stein 1 gemessen wurden könnte wiederum auf die Form zurückgeführt werden. Allerdings gibt es bei den Sprüngen mit kürzeren vorangehenden Flugphasen keinen Hinweis, dass Stein 1 grundsätzlich längere Flugzeiten erreicht. Es könnte aber durchaus sein, dass Stein 1 dank seiner beinahe runden Form eine höhere Geschwindigkeit erreichen und damit auch längere und weitere Sprünge vollführen kann. Da bei der Auswertung dieser Arbeit die Sprungweiten und Geschwindigkeiten nicht dabei waren, ist diese Aussage allerdings mit Vorsicht zu geniessen.

Die Feststellung, dass die drei Einschläge mit den höchsten Beschleunigungen, im Vergleich von `a_mean_gefiltert` ohne die Ausreisser, von Stein 4 stammen (Abbildung 24: Abhängigkeit von `a_mean_gefiltert` von der Dauer zwischen den Einsschlägen ohne Ausreisser. Abbildung 24) ist nicht

sehr aussagekräftig, da dieser Umstand nur bei diesem Vergleich gefunden wurde. Bei allen anderen Vergleichen von der Flugzeit und den Beschleunigungen ist dies nicht ersichtlich.

Ansonsten lässt sich nur erkennen, dass je länger die Flugphase dauerte, desto grösser wurden die kleinsten Beschleunigungen. Aufgrund der rein optischen Auswertung dieser Daten ist sonst kein klarer Trend auszumachen. Auch einen generellen Einfluss der Steinform ist nicht direkt erkennbar. Vielmehr ist vermutlich entscheidender, auf welche Bodenmaterie der Stein aufprallt. Die Geländeneigung könnte aber durchaus auch eine Rolle spielen. Bei Sutter (2017) konnten ebenfalls keine Trends erkannt werden.

5.2.8 Einfluss der Dauer des Einschlages auf die Beschleunigung

Die Frage, ob sich die Dauer des Einschlages auf die Beschleunigung auswirkt, kann aufgrund der optischen Auswertung nicht abschliessend beantwortet werden. Einzige wirkliche Auffälligkeit sind die vier längsten Einschläge, wobei die beiden längsten bei Stein 2 und die anderen beiden bei Stein 1 gemessen wurden. Ansonsten zeigt sich hier ein ähnliches Bild wie bei den Flugzeiten. Je länger der Einschlag dauerte desto grösser wurden die kleinsten Beschleunigungen.

Anders als bei Sutter (2017) als ein klarer Trend zu erkennen war, dass die Einschläge mit den höchsten Beschleunigungen eine Dauer zwischen 0.05s und 0.15s aufweisen, kann in dieser Arbeit kein solcher Trend erkannt werden. Die Dauer der Einschläge kann unter anderem von der Oberflächenbeschaffenheit, sowie auch der Geländeneigung abhängig sein. Eine kurze Einschlagsdauer könnte also vorkommen, wenn der Stein auf eine harte Oberfläche trifft, was auch eine hohe Beschleunigung erklären könnte. Aus diesen Gründen wird hier vermutet, dass die Dauer des Einschlages allein keinen entscheidenden Einfluss auf die Beschleunigung hat.

Dasselbe gilt wohl auch bei der Frage ob die Dauer der Flugphase einen entscheidenden Einfluss auf die Dauer des Einschlages hat.

5.3 Einfluss der Flugzeit auf die Dauer des Einschlages

Als letztes bleibt noch die Frage, ob die Flugzeit vor einem Einschlag einen Einfluss auf dessen Dauer hat. Auch diese Daten wurden nur optisch ausgewertet, weisen aber keine klaren Trends ersichtlich sind.

Obwohl auch hier gilt, dass je länger die Flugzeit vor dem Einschlag ist, desto länger sind die kürzesten Einschläge. Aber dies gilt nur für Hänge mit gleichen Bewuchs wie der Versuchshang in Tschamut. Bei steinigem oder felsigen Hängen wären andere Resultate, wie zum Beispiel, dass es

vermutlich gar nicht so lange Einschläge geben würde, zu erwarten. Bei Sutter (2017) wurde dieser Zusammenhang nicht analysiert.

5.4 Besonderheiten

5.4.1 Doppeleinschlag

Diese 18 cm aus Kapitel 4.4.1 sind nicht sehr weit, aber da es auch Doppeleinschläge mit einer Sprungphase von 0.05 s gab, was einer ungefähren Sprungdistanz von 50 cm entsprechen würde, konnte dieser Umstand nicht übergangen werden. Dass die Auswertung einheitlich war, wurden alle Mehrfacheinschläge auseinandergenommen. Ob und Inwiefern diese kurzen Flugphasen Einfluss auf die Auswertungen gehabt haben kann nicht gesagt werden.

5.4.2 Buschkontakt

Den Buschkontakten konnten keine direkten Einflüsse auf die Resultate dieser Arbeit nachgewiesen werden. Auch sonst würde ein solcher Busch vermutlich keinen grossen Einfluss nehmen. Dies ist auch an den Rotationsgeschwindigkeiten zu erkennen, welche sich während dem Buschkontakt leicht verringerten, danach aber wieder auf das gleiche Niveau wie vor dem Kontakt stiegen.

5.4.3 Rollphasen

Auch bei der Rollphase in Versuch 057 ist es schwierig zu sagen ob es wirklich einen Einfluss auf die weiteren Einschläge dieses Versuches hatte. Einzig gut sichtbar ist die Veränderung der Rotationsgeschwindigkeit welche nach der Rollphase nicht mehr so hoch war wie zuvor.

6 Schlussfolgerungen mit Ausblick

Abschliessend kann dazu gesagt werden, dass sich jeder Stein grundsätzlich anders verhält. Trotzdem wurde eine gewisse Ähnlichkeit zwischen Stein 1 und Stein 2 entdeckt, was vermutlich auf die ähnliche Form zurückzuführen ist. Zumindest kann man davon ausgehen, dass es sich auf einem Grashang, wie jener in Tschamut, so verhält. Jedoch wurden in dieser Auswertung die Hangneigung und die Untergrundbeschaffung des Grashanges nicht analysiert, weshalb diese Aussage stark generalisiert ist.

Weshalb sich die Daten von `a_mean_ungefiltert` bei den statistischen Auswertungen gegenüber den restlichen Parameter so unterscheiden, kann nicht erklärt werden. In Sutter (2017) wurden keine solchen Abweichungen gefunden. Spannend wäre hier, wenn diese Versuche mit RAMMS::ROCKFALL simuliert und dann, mit den in dieser Arbeit ausgewerteten Resultate verglichen würden. Auch um herauszufinden, ob die Daten von `a_mean_ungefiltert` auch solche Abweichungen aufweist.

Für weitere Untersuchungen in diese Richtung wäre es wichtig, solche Versuche wenn möglich auch auf einem steinigen oder felsigen Untergrund durchzuführen. Ebenfalls wäre eine Analyse der Sprunglänge und Sprunghöhe interessant. Die Sprunglänge konnte in dieser Arbeit nicht miteinbezogen werden, da die Reichweite der Steine nur die horizontale Reichweite war und nicht die effektive Distanz welche die Steine im Hang wirklich zurückgelegt hatten. Sehr wichtig wäre auch eine Automatisierung des Bestimmungsprozesses von Start- und Endzeitpunkten der Einschläge, damit in Zukunft sämtliche Auswertungen nach dem genau gleichen Schema ablaufen und die Resultate ohne Abweichungen miteinander vergleichbar sind.

7 Literaturverzeichnis

Allen, M. (1976). Kolmogorov-Smirnov Test for Discrete Distributions. Naval Postgraduate School Monterey California, USA.

Brügger, L. (2014). Erfassung und Auswertung von Steinschlagflugbahnen im Gelände. *Bachelorarbeit ZHAW*, unveröffentlicht. ZHAW, Wädenswil, Departement N.

Butterworth, S. (1930). On the Theory of Filter Amplifiers. *Experimental wireless & the wireless engineer*, (7), 1930, S. 536–541.

Burrus, C. (2012). Digital Signal Processing and Digital Filter Design (Draft). Rice University, Houston, Texas.

Gees, F. (2014): Erfassung und Auswertung von Steinschlagflugbahnen mittels Video. *Bachelorarbeit ZHAW*, unveröffentlicht. ZHAW, Wädenswil, Departement N.

Haykin, S. & Van Veen, B. (1999). *Signals and Systems*. New York: John Wiley & Sons, Inc.

Kummer, P. (2015). Praktikumsbericht: Synchronisieren der Tschamut Daten. unveröffentlicht. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf.

Lardon, J. (2014). Vergleich von Steinschlagsimulationen mit den entsprechenden Feldversuchen. *Bachelorarbeit ZHAW*, unveröffentlicht. ZHAW, Wädenswil, Departement N.

Mürset, U., Schilling, S., Ott, T. (2015). Schliessende Statistik für Umweltingenieure, Kursunterlagen; ZHAW Skript im Fach Schliessende Statistik für Umweltingenieure.

Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT (2017a). Entstehung von Steinschlag und Felssturz. Abgerufen am 14.08.2017 von <http://www.planat.ch/de/wissen/rutschung-und-felssturz/steinschlag-felssturz/entstehung-s-f/>.

Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT (2017b). Bergsturz. Abgerufen am 14.08.2017 von <http://www.planat.ch/de/wissen/rutschung-und-felssturz/bergsturz/>.

Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT (2017c). Steinschlag und Felssturz. Abgerufen am 14.08.2017 von <http://www.planat.ch/de/wissen/rutschung-und-felssturz/steinschlag-felssturz/>.

Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT (2017d). Massnahmen gegen Steinschlag und Felssturz. Abgerufen am 14.08.2017 von <http://www.planat.ch/de/wissen/rutschung-und-felssturz/steinschlag-felssturz/massnahmen-s-f/>.

Rahman, M. & Govindarajulu, Z. (1997) A modification of the test of Shapiro and Wilk for normality. *Journal of Applied Statistics*, 24 (2), 219-235.

Sutter, T. (2017). Einschlagcharakteristik natürlicher Steine. *Semesterarbeit 2 ZHAW*, unveröffentlicht. ZHAW, Wädenswil, Departement N.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Hangsituation bei der Rekognoszierung im Mai 2014 (Quelle: Brügger, 2014).	3
Abbildung 2: Links: Stein 1; Mitte: Stein 2; Rechts: Stein 4 (Quelle: Volkwein, A. (WSL)).	4
Abbildung 3: Vergleich der gefilterten und ungefilterten Daten der Sonde 1.	5
Abbildung 4: Beispielergebnis einer Fast-Fourier-Transformation (Quelle: Zur Verfügung gestellt von Volkwein, A. (WSL)).	6
Abbildung 5: Definition der Einschlagdauer eines einzelnen Einschlages.	8
Abbildung 6: Beispiel für die an-die-Mauerkante-Rollen Phase mit anschliessender erster Flugphase.	9
Abbildung 7: Visuelle Ermittlung der Dauer eines Einschlages.	10
Abbildung 8: Start und Ende einer Ausrollphase.	11
Abbildung 9: Vergleich der Einschlagsdauer von Kummer (2014) und Sutter (2017 BA) von Versuch 009. Mit Sutter (2017 BA) ist die Auswertung der vorliegenden Bachelorarbeit gemeint.	13
Abbildung 10: Beispiel eines Doppeleinschlages, bei welchem keine klare Flugphase zwischen den beiden Einschlägen erkennbar ist mit Detailskizze für diese Problemlösung.	14
Abbildung 11: Gegenübersetzung der Anzahl Sprünge und der zurückgelegten horizontalen Distanz.	17
Abbildung 12: Variation der horizontalen Reichweite der einzelnen Steine.	18
Abbildung 13: Übersicht der Variation der horizontalen Reichweite von den einzelnen Startpunkten aus.	19
Abbildung 14: Übersicht der Anzahl Sprünge von den einzelnen Startpunkten aus.	22
Abbildung 15: Gegenüberstellung von $a_{\max_gefiltert}$ und $a_{\max_ungefiltert}$, mit den Ausreissern, mit Regressionskurven, um zu veranschaulichen, wie gross der Einfluss des Filterns ist.	27
Abbildung 16: Gegenüberstellung von $a_{\max_gefiltert}$ und $a_{\max_ungefiltert}$, ohne Ausreisser, mit Regressionskurven, um zu veranschaulichen, wie gross der Einfluss des Filterns ist.	28

Abbildung 17: Gegenüberstellung von a_mean_gefiltert und a_mean_ungefiltert, mit den Ausreissern, mit Regressionskurven, um zu veranschaulichen, wie gross der Einfluss des Filterns ist.	29
Abbildung 18: Gegenüberstellung von a_mean_gefiltert und a_mean_ungefiltert, ohne Ausreisser, mit Regressionskurven, um zu veranschaulichen, wie gross der Einfluss des Filterns ist.	30
Abbildung 19: Histogramme aller maximalen Beschleunigungen auf die jeweiligen Parameter verteilt.	32
Abbildung 20: Histogramme aller durchschnittlichen Beschleunigungen auf die jeweiligen Parameter verteilt.	33
Abbildung 21: Abhängigkeit von a_max_gefiltert von der Dauer zwischen den Einschlägen mit den Ausreissern.	41
Abbildung 22: Abhängigkeit von a_max_gefiltert von der Dauer zwischen den Einschlägen ohne Ausreisser.	42
Abbildung 23: Abhängigkeit von a_mean_gefiltert von der Dauer zwischen den Einschlägen mit den Ausreissern.	43
Abbildung 24: Abhängigkeit von a_mean_gefiltert von der Dauer zwischen den Einschlägen ohne Ausreisser.	44
Abbildung 25: Gegenüberstellung von der Dauer der Einschläge und a_max_gefiltert mit den Ausreissern.	45
Abbildung 26: Gegenüberstellung von der Dauer der Einschläge und a_max_gefiltert ohne Ausreisser.	46
Abbildung 27: Gegenüberstellung von der Dauer der Einschläge und a_mean_gefiltert mit den Ausreissern.	47
Abbildung 28: Gegenüberstellung von der Dauer der Einschläge und a_mean_gefiltert ohne Ausreisser.	48
Abbildung 29: Gegenüberstellung von der Dauer der Einschläge und a_mean_ungefiltert ohne Ausreisser.	48
Abbildung 30: Gegenüberstellung der Dauer des Einschlages und der Dauer der Flugphase vor dem Einschlag mit Ausreissern.	49

Abbildung 31: Gegenüberstellung der Dauer des Einschlages und der Dauer der Flugphase vor dem Einschlag ohne Ausreisser.	50
Abbildung 32: Veranschaulichung eines Doppeleinschlages (aus dem Beispiel von Kapitel 3.6). Ausgezogene Linie: 1. Einschlag; gestrichelte Linie: 2. Einschlag.	51
Abbildung 33: Diagrammausschnitt eines Buschkontaktes.	52
Abbildung 34: Videostandbild von der Hangsituation mit Busch, Startpunkt b und einem Versuchsstein.	52
Abbildung 35: Rollphase während des Sturzes bei Versuch 057.	53

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Versuchssteine Nr. 1, 2 und 4.....	4
Tabelle 2: Auflistung der wählbaren Kalibrierwerte mit Beispielswerten, beim Versuch der Automatisierung mit Microsoft Excel 2016.....	12
Tabelle 3: Durchschnittliche horizontale Reichweiten der einzelnen Steine, sowie der Standardabweichungen der horizontalen Reichweiten und der Anzahl durchgeführter Versuche..	18
Tabelle 4: Durchschnittliche horizontale Reichweiten der einzelnen Startpunkte, sowie der Standardabweichungen der horizontalen Reichweiten und die Anzahl Versuche mit den einzelnen Steinen.	20
Tabelle 5: Aufteilung der horizontalen Reichweite und deren Standardabweichung in die Startpunkte und Steine.....	20
Tabelle 6: Durchschnittliche Anzahl Einschläge, sowie deren Standardabweichungen.....	21
Tabelle 7: Aufteilung der Anzahl Einschläge und deren Standardabweichung in die Startpunkte und Steine.....	23
Tabelle 8: Beschreibung der verschiedenen Beschleunigungsparameter.....	24
Tabelle 9: Gegenüberstellung der Durchschnitte und Median der einzelnen Parameter über alle Messungen gesehen. Das ohne steht hierbei für die Messungen ohne Ausreisser.	25
Tabelle 10: R ² -Werte des Bestimmtheitsgrades der verschiedenen Parameter	26
Tabelle 11: p-Werte des Shapiro-Wilk-Testes bei der Frage ob alle Daten innerhalb der jeweiligen Beschleunigungsparameter normal verteilt sind.	31
Tabelle 12: p-Werte des Shapiro-Wilk-Testes bei der Frage ob sich die Daten innerhalb der einzelnen Steine und der jeweiligen Beschleunigungen ähnlich sind. In diesen Daten sind die Ausreisser mit einbezogen.	34
Tabelle 13: p-Werte des Shapiro-Wilk-Testes bei der Frage ob sich die Daten innerhalb der einzelnen Steine und der jeweiligen Beschleunigungen ähnlich sind. In diesen Daten sind die Ausreisser nicht mit einbezogen.....	34
Tabelle 14: Mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test verglichene Verteilungen der Parameter zwischen den einzelnen Steinen, mit Berücksichtigung der Ausreisser. Die hervorgehobenen Werte stehen für die gefundenen Ähnlichkeiten.....	35

Tabelle 15: Mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test verglichene Verteilungen der Parameter zwischen den einzelnen Steinen. Die Ausreisser sind hier weggelassen. Die hervorgehobenen Werte stehen für die gefundenen Ähnlichkeiten.	36
Tabelle 16: Resultate des Kruskal-Wallis-Tests zur Frage, ob die Messungen der einzelnen Parameter, zusammengefasst zu den Steinen, ähnlich sind. Die hervorgehobenen Werte stehen für die gefundenen Ähnlichkeiten.....	37
Tabelle 17: p-Werte der Auswertung bezüglich der Ähnlichkeiten der Mediane der verschiedenen Steine mit Ausreissern. Die hervorgehobenen Werte stehen für die gefundenen Ähnlichkeiten. ...	38
Tabelle 18: p-Werte der Auswertung bezüglich der Ähnlichkeiten der Mediane der verschiedenen Steine ohne die Daten der Ausreisser. Die hervorgehobenen Werte stehen für die gefundenen Ähnlichkeiten.....	38
Tabelle 19: Durchschnittliche Beschleunigungen der einzelnen Steine mit den Ausreissern.	39
Tabelle 20: Durchschnittliche Beschleunigungen der einzelnen Steine ohne den Ausreissern.	39

Formelverzeichnis

Formel 1: Formel für die Berechnung von der Kraft F zwischen Boden und Stein sowie der Beschleunigung a des Steines.....	57
--	----

Anhang

Anhang A:	Plagiatserklärung
Anhang B:	Poster
Anhang C:	Vergleich automatisierte und manuelle Auswertung
Anhang D	Histogramme zur Normalverteilung unterteilt in die einzelnen Steine
Anhang E:	Diagramme der Kolmogorov-Smirnov-Tests
Anhang F:	Diagramme zu: Einfluss der Flugzeit auf die Beschleunigung
Anhang G:	Diagramme zu: Einfluss der Einschlagsdauer auf die Beschleunigung

Anhang A

Zürcher Hochschule
für Angewandte Wissenschaften



Life Sciences und
Facility Management

Erklärung betreffend das selbständige Verfassen einer Bachelorarbeit im Departement Life Sciences und Facility Management

Mit der Abgabe dieser Bachelorarbeit versichert der/die Studierende, dass er/sie die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst hat.

Der/die unterzeichnende Studierende erklärt, dass alle verwendeten Quellen (auch Internetseiten) im Text oder Anhang korrekt ausgewiesen sind, d.h. dass die Bachelorarbeit keine Plagiate enthält, also keine Teile, die teilweise oder vollständig aus einem fremden Text oder einer fremden Arbeit unter Vorgabe der eigenen Urheberschaft bzw. ohne Quellenangabe übernommen worden sind.

Bei Verfehlungen aller Art treten Paragraph 39 und Paragraph 40 der Rahmenprüfungsordnung für die Bachelor- und Masterstudiengänge an der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften vom 29. Januar 2008 sowie die Bestimmungen der Disziplinarmassnahmen der Hochschulordnung in Kraft.

Ort, Datum:

Unterschrift:

A handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized 'S' followed by a horizontal line and a checkmark-like flourish.

Wädenswil, 06. September 2017.

.....

Das Original dieses Formulars ist bei der ZHAW-Version aller abgegebenen Bachelorarbeiten im Anhang mit Original-Unterschriften und -Datum (keine Kopie) einzufügen.

Anhang B



Untersuchungen zur Variabilität von Steinschlagflugbahnen

Tobias Sutter



1. Einleitung

In der Schweiz gehören städtische wegen ihrer häufigen Vorkommen zu den bedeutendsten Natagebieten. Obwohl sie nur sehr lokal vorkommen, können die Auswirkungen auf Mensch, Tiere und Infrastruktur fatal sein. Um die Auswirkungen so gering wie möglich zu halten und um Vorsorge-massnahmen treffen zu können, werden mittels Simulationsprogrammen Städtische simuliert. Die Resultate solcher numerischen Modelle sind zwar recht zuverlässig, stimmen jedoch häufig nicht mit der Realität überein. Deshalb ist es wichtig, dass diese Simulationsprogramme mit Erfahrungswerten aus möglichst realistischen Versuchen abgeglichen und kalibriert werden.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Vielfalt der einzelnen Sprünge möglichst allgemein in einem stochastischen Modell zu formulieren. Mit Hilfe des Modells können dann Stochastiksimulationen verbessert und analysiert werden.

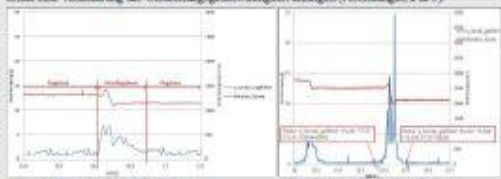
2. Datengrundlagen

Im Juni 2014 wurden, von der WSI, ein Oberenypso bei Tschamä (SR) Steinzeugversuche durchgeführt, welche von drei Bachschülerinnen vom Umweltgrenz-Studien der ZHAW Widnau begleitet wurden. Die Steine wurden von roten verschiedenen Stepparten eines einzigen biotiniten. Während dem Versuchen wurde, mit einer in die Steine eingehaltenen Sonde die Beschleunigung, Rotationsgeschwindigkeit und indirekt die Position gemessen. Im Herbstsemester 2016 wurden in einer Sensorenarbeit (Sutter, 2007), die als Machbarkeitsstudie diente, mit der Bearbeitung von zehn Versuchen bereits erste Auswertungen vorgenommen. Auf Abbildung 1 sind die Versuchung in Tschamä und die drei Versuchsteile, welche die verwendeten Daten liefern, zu sehen.



3. Methode

In dieser Bachelorarbeit werden die zehn Versuche aus der Sensorenarbeit auf 78 Versuche ausgeweitet. Für die Auswertung musste zuerst für jeden Versuch die Anzahl und die Dauer der einzelnen Einschläge bestimmt werden. Wie keine genaue Zeitdefinition existiert und deshalb eine automatische Bestimmung nicht möglich war, erfolgte die Abschätzung der Einschlagdauern optisch. Dafür wurde festgelegt, dass ein einzelner Einschlag beginnt, sobald die Beschleunigungskurve abrupt höher ansteigt und das regelmäßige Muster der Flugphase verliert. Dazu muss auch die Kurve der Rotationsrate eine Veränderung der Umlaufgeschwindigkeit erzeugen (Abbildungen 2 & 3).



...and the fact that the product is intended for investigation.

Anleitung 1: Aufgabe zur praktischen Anwendung der Vorgehensweise

Von den Einschlägen wurden jeweils die maximalen und die durchschnittlichen Beschleunigungen bestimmt und in separate Parameter unterteilt. Diese wurden mit RStudio und folgenden statistischen Tests analysiert:

- | | |
|----------------------------|---|
| - Shapiro-Wilk-Test: | Sind die Daten der einzelnen Parameter Normalverteilt? |
| - Kolmogorov-Smirnov-Test: | Sind die Verteilungen innerhalb der Parameter signifikant anders? |
| - Kruskal-Wallis-Test: | Weisen die Beschleunigungen der einzelnen Steins signifikante Unterschiede vor? |
| - Pairwise-Wilcoxon-Test: | Bei welchen Steinen ist der Median der Beschleunigungsparameter signifikant anders? |

Die weiteren Auswertungen wurden optisch mit Microsoft Excel 2016 durchgeführt.

4. Resultate I

Reichwelts:

In Abbildung 4 sind die durchschnittlichen horizontalen Reichweiten der Steine von den jeweiligen Startpunkten aus dargestellt. Tabelle 1 listet zudem auf, wie viele Versuche von den jeweiligen Startpunkten gestartet worden sind. Die durchschnittlichen horizontalen Reichweiten liegen alle in einem Bereich von 92,1 m bis 100,4 m. Von Startpunkt a und h gibt es keine Messungen, die in die Auswertung eingebracht sind. Tabelle 2 unterteilt die horizontale Reichweite in die einzelnen Steine.

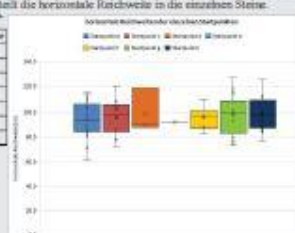
burg cingollosati, scil. Tabelle 1 und 2).

Skizzenprotokoll	Anzahl	Yonachse	durch. Knotenweite
la	24		30,6 cm
a	10		25,8 cm
al	5		30,7 cm
a	1		26,3 cm
f	10		27,9 cm
g	16		31,4 cm
f	14		28,6 cm

He also is the founder of the *Journal of Management Inquiry*.

Station No.	Distance, H (m)
1	100.0 m
2	199.5 m
3	299.0 m

δ	0.7 mm
----------	--------



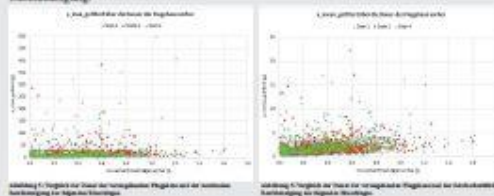
4. Resultate II

Verteilungen

Eine Normalverteilung lag bei keinem der Parameter vor. Bei den Vergleichen der einzelnen Steine gab es oft Ähnlichkeiten zwischen Stein 1 und Stein 2 welche beide eine runde Form hatten. Zum anderen Stein 4 gab es fast keine Ähnlichkeiten.

Einfluss der Flugzeit auf die Beschleunigung

Einziger erkennbarer Trend auf den Abbildungen 5 & 6 ist, dass je länger die Flugphase dauerte, desto größer wurden die kleinsten Beschleunigungen im Vergleich zu jenen mit den kürzesten Flugphasen. Ansonsten bestehen keine offensichtliche Zusammenhänge zwischen der Dauer der Flugzeit und der Beschleunigung.



5. Diskussion

Dass es bei den horizontalen Reichweiten, nach den Startpunkten aufgeteilt, keine grossen Unterschiede gibt, rührt vornehmlich von der Beschaffenheit des Versuchsaufbaus her, welche nicht sehr abwechslungsreich war. Wird die Reichweite der einzelnen Steine angeschaut, ist eindeutig, dass die Form eine sehr grosse Rolle spielt. Wie zu erwarten ist, gilt je runder der Stein, desto höher die Reichweite. Sehr gut zu sehen, da Stein 1 welcher beinahe rund ist die deutlich höchste Reichweite aufweist.

Wie aufgrund der Resultate aus Sutter (2007) zu erwarten war, liegen keine Normalverteilungen vor. Die Ähnlichkeiten von Stein 1 und Stein 2 ziehen sich durch die meisten der durchgeführten statistischen Tests weiter. Dies lässt vermuten, dass dabei die räumliche Form dieser beiden Steine eine sehr grosse Rolle spielt. Daraus lässt sich schliessen, dass sich ähnliche Steine durchaus auch ähnlich verhalten können.

Die Frage, ob sich die Dauer des Einschlages auf die Beschleunigung auswirkt, kann aufgrund der optischen Auswertung nicht abschliessend beantwortet werden. Vermutlich hängt die Beschleunigung mehr von der Härte und der Bodenbeschaffenheit ab, als von der vorhergehenden Flugphase.

Für weitergehende Untersuchungen in diese Richtung wäre es sehr wichtig eine automatisierte Bestimmung der Einseitigkeit einzurichten, damit die Auswertung auch einheitlich abläuft und nicht von der auswertenden Person abhängig ist. Dazu kommt, dass die Hangeinseitigkeit sowie auch die Bodenbeschaffung mehr miteinander bezogen werden sollte. Spannend wäre zudem auch eine Messung der effektiven Seilnutenbreite und -höhe.

Anhang C

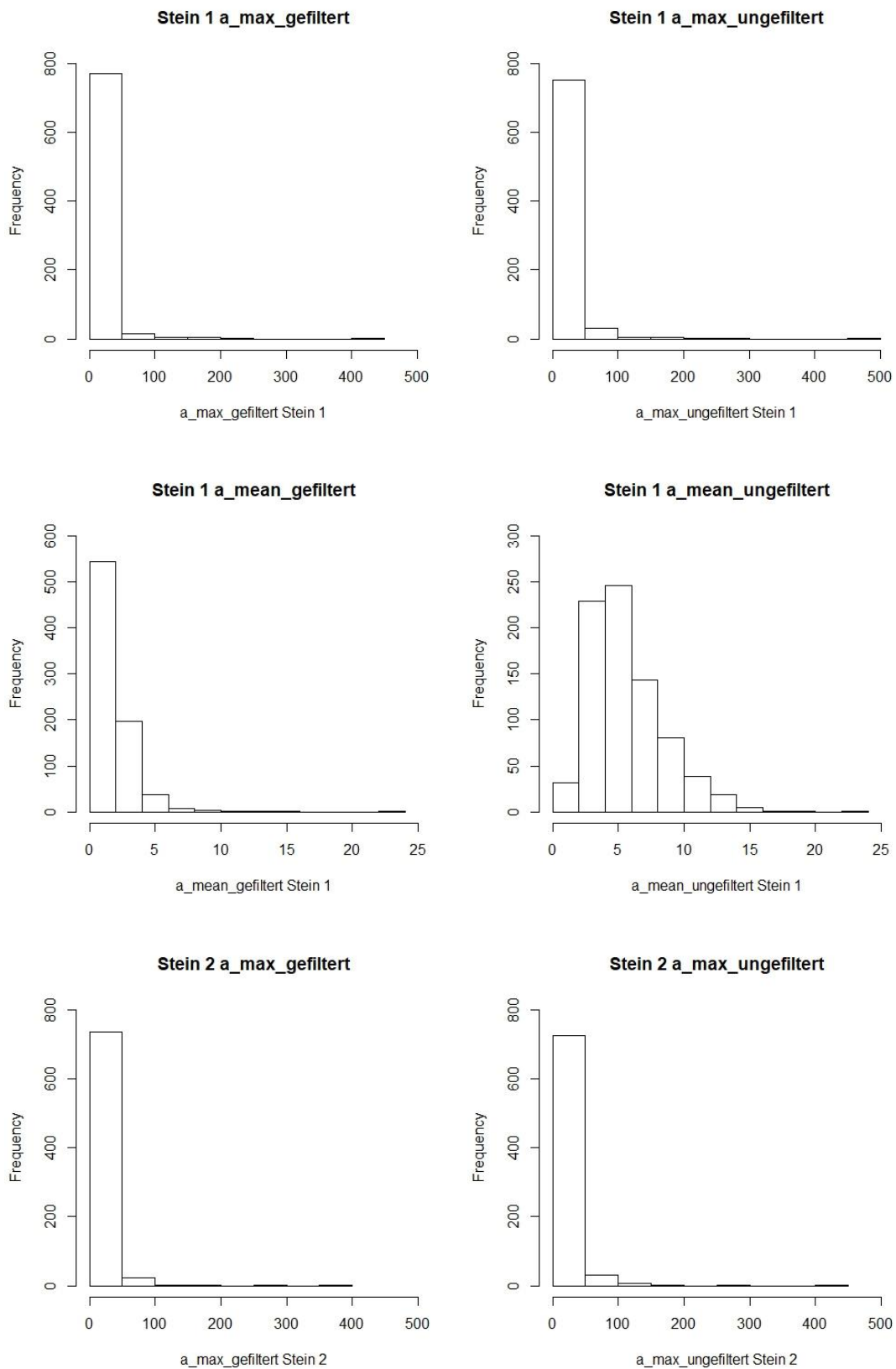
Vergleich der Einschlagszeiten zwischen der automatisierten und manuellen Auswertung von Versuch004. a: Einschlag; f: Flugphase; r: Ausrollphase.

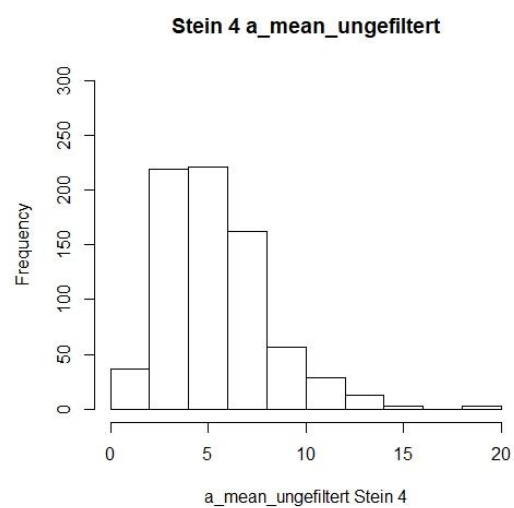
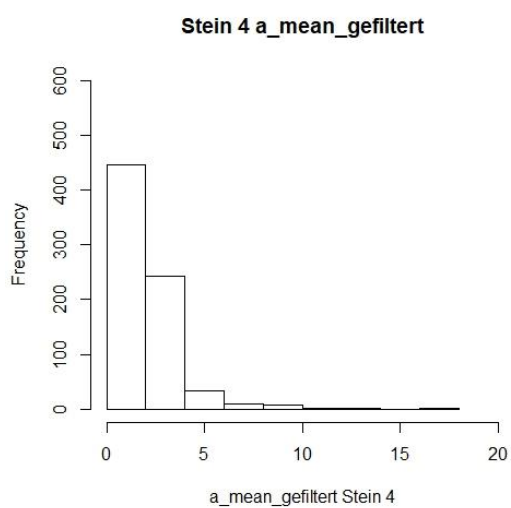
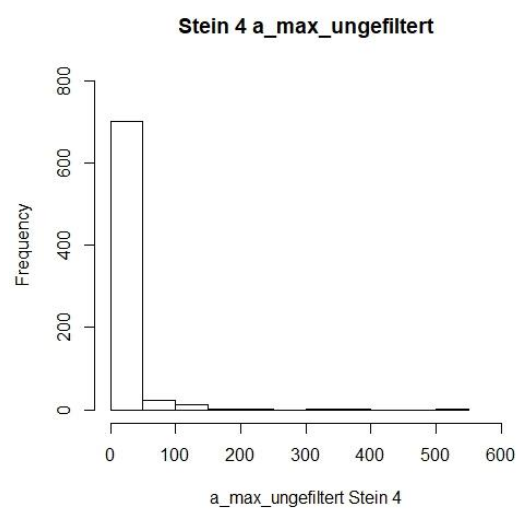
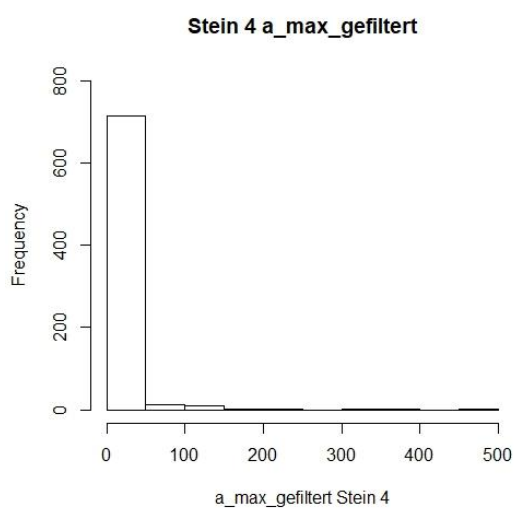
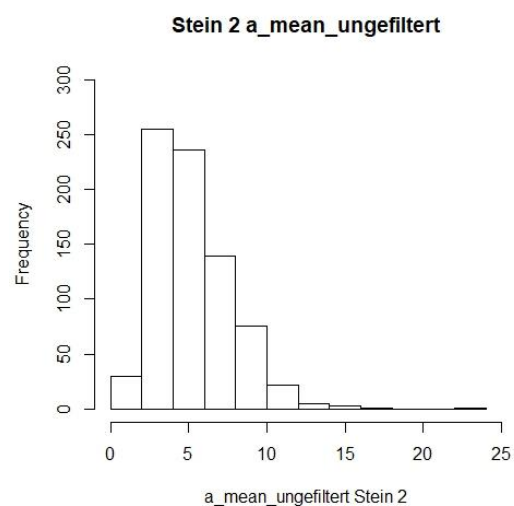
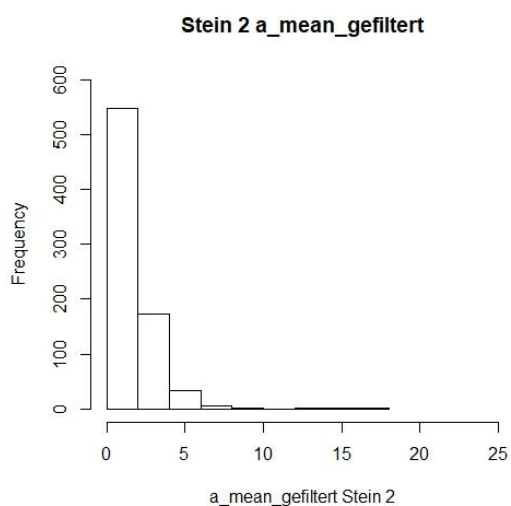
	Automatisiert		Auswertung Sutter			
Art	Startzeit [s]	Endzeit [s]	Startzeit [s]	Endzeit [s]	Differenz Startzeit [s]	Differenz Endzeit [s]
a	4.550	4.552	4.507	4.663	0.043	-0.111
f	4.553	4.659	4.664	5.319	-0.111	-0.660
a	4.660	4.661	5.320	5.439	-0.660	-0.778
f	4.662	4.985	5.440	5.697	-0.778	-0.712
a	4.986	4.988	5.698	5.851	-0.712	-0.863
f	4.989	5.015	5.852	6.412	-0.863	-1.397
a	5.016	5.045	6.413	6.559	-1.397	-1.514
f	5.046	5.083	6.560	7.162	-1.514	-2.079
a	5.084	5.087	7.163	7.313	-2.079	-2.226
f	5.088	5.219	7.314	7.803	-2.226	-2.584
a	5.220	5.231	7.804	7.891	-2.584	-2.660
f	5.232	5.262	7.892	8.100	-2.660	-2.838
a	5.263	5.282	8.101	8.173	-2.838	-2.891
f	5.283	5.529	8.174	8.452	-2.891	-2.923
a	5.530	5.531	8.453	8.555	-2.923	-3.024
f	5.532	5.878	8.556	8.604	-3.024	-2.726
a	5.879	5.932	8.605	8.646	-2.726	-2.714
f	5.933	6.290	8.647	8.900	-2.714	-2.610
a	6.291	6.292	8.901	9.004	-2.610	-2.712
f	6.293	6.921	9.005	9.720	-2.712	-2.799
a	6.922	6.977	9.721	9.843	-2.799	-2.866
f	6.978	7.052	9.844	10.712	-2.866	-3.660
a	7.053	7.054	10.713	10.833	-3.660	-3.779
f	7.055	7.383	10.834	12.044	-3.779	-4.661
a	7.384	7.458	12.045	12.192	-4.661	-4.734
f	7.459	8.666	12.193	12.722	-4.734	-4.056
a	8.667	8.723	12.723	12.850	-4.056	-4.127
f	8.724	9.223	12.851	13.337	-4.127	-4.114
a	9.224	9.272	13.338	13.442	-4.114	-4.170
f	9.273	10.087	13.443	13.549	-4.170	-3.462
a	10.088	10.183	13.550	13.656	-3.462	-3.473
f	10.184	10.723	13.657	13.947	-3.473	-3.224
a	10.724	10.815	13.948	14.024	-3.224	-3.209
f	10.816	10.850	14.025	14.261	-3.209	-3.411

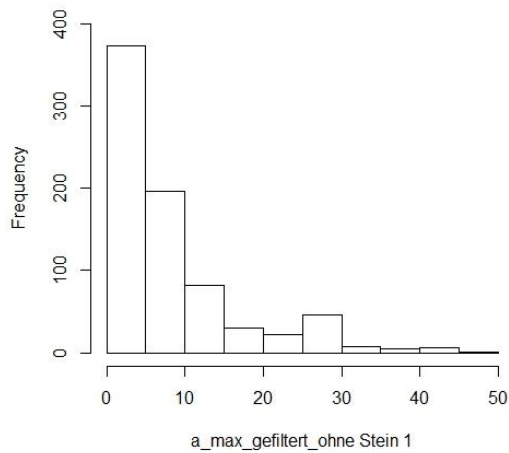
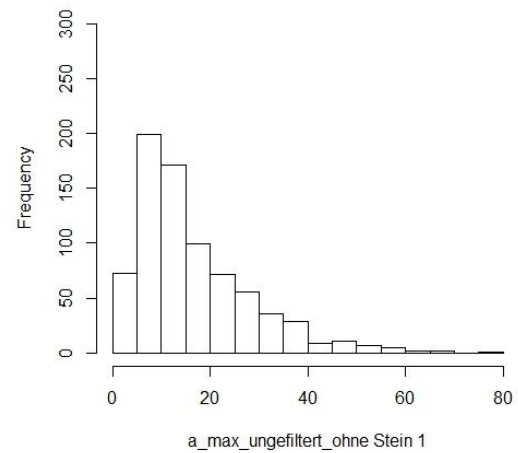
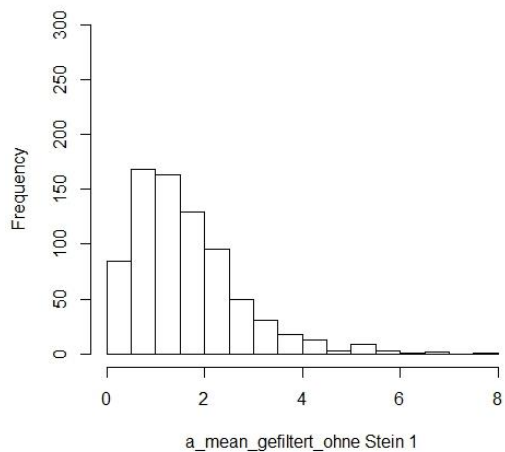
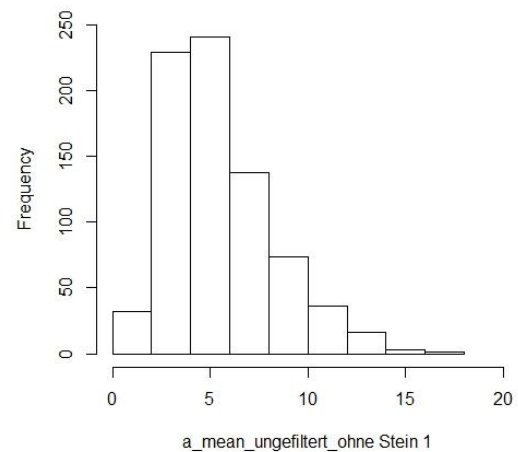
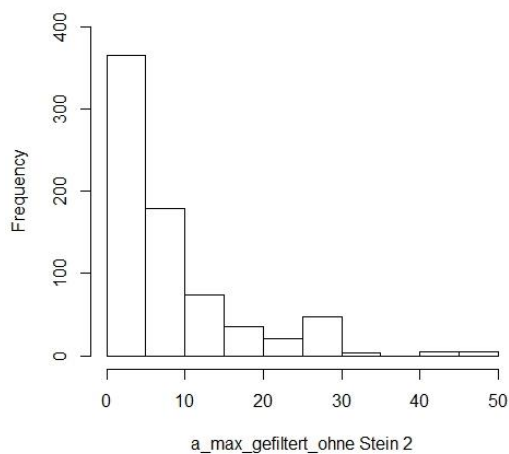
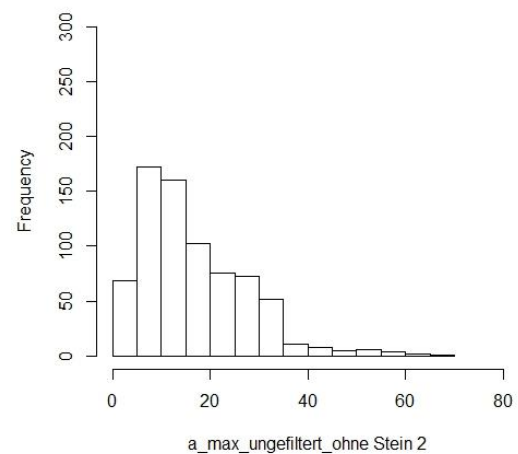
a	10.851	10.863	14.262	14.404	-3.411	-3.541
f	10.864	11.805	14.405	14.645	-3.541	-2.840
a	11.806	11.870	14.646	14.767	-2.840	-2.897
f	11.871	12.696	14.768	15.294	-2.897	-2.598
a	12.697	12.770	15.295	15.425	-2.598	-2.655
f	12.771	13.323	15.426	15.943	-2.655	-2.620
a	13.324	13.388	15.944	16.046	-2.620	-2.658
f	13.389	13.697	16.047	16.412	-2.658	-2.715
a	13.698	13.758	16.413	16.553	-2.715	-2.795
f	13.759	14.420	16.554	16.805	-2.795	-2.385
a	14.421	14.472	16.806	16.883	-2.385	-2.411
f	14.473	15.268	16.884	17.049	-2.411	-1.781
a	15.269	15.318	17.050	17.144	-1.781	-1.826
f	15.319	16.019	17.145	17.423	-1.826	-1.404
a	16.020	16.088	17.424	17.508	-1.404	-1.420
f	16.089	16.553	17.509	17.569	-1.420	-1.016
a	16.554	16.610	17.570	17.618	-1.016	-1.008
f	16.611	16.975	17.619	17.782	-1.008	-0.807
a	16.976	17.022	17.783	17.850	-0.807	-0.828
f	17.023	17.393	17.851	17.960	-0.828	-0.567
a	17.394	17.417	17.961	18.037	-0.567	-0.620
f	17.418	17.698	18.038	18.216	-0.620	-0.518
a	17.699	17.739	18.217	18.285	-0.518	-0.546
f	17.740	18.143	18.286	18.446	-0.546	-0.303
a	18.144	18.175	18.447	18.500	-0.303	-0.325
f/r	18.176	18.195	18.501	21.048	-0.325	
a	18.196	18.228				
f	18.229	18.518				
a	18.519	18.531				
f	18.532	18.533				
a	18.534	18.553				
f	18.554	18.561				
a	18.562	18.603				
f	18.604	18.820				
a	18.821	18.858				
f	18.859	19.086				
a	19.087	19.126				
r	19.127					

Anhang D

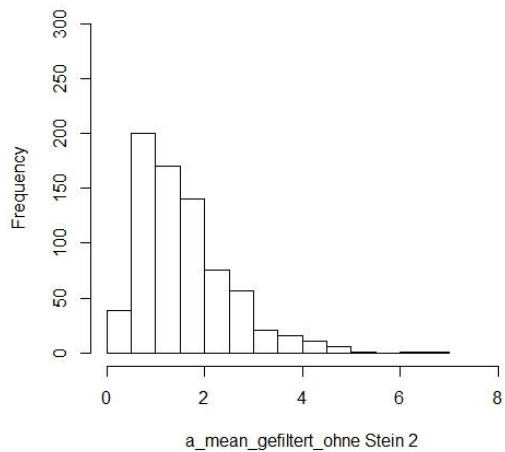
Histogramme der Normalverteilung (mit Ausreisser)



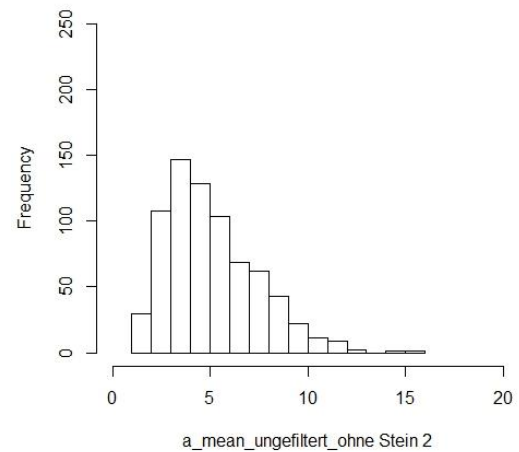


Histogramme der Normalverteilung (ohne Ausreisser)**Stein 1 a_max_gefiltert ohne Ausreisser****Stein 1 a_max_ungefiltert ohne Ausreisser****Stein 1 a_mean_gefiltert ohne Ausreisser****Stein 1 a_mean_ungefiltert ohne Ausreisser****Stein 2 a_max_gefiltert ohne Ausreisser****Stein 2 a_max_ungefiltert ohne Ausreisser**

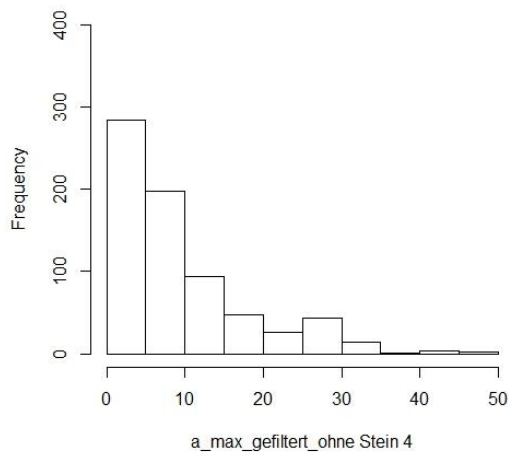
Stein 2 a_mean_gefiltert ohne Ausreisser



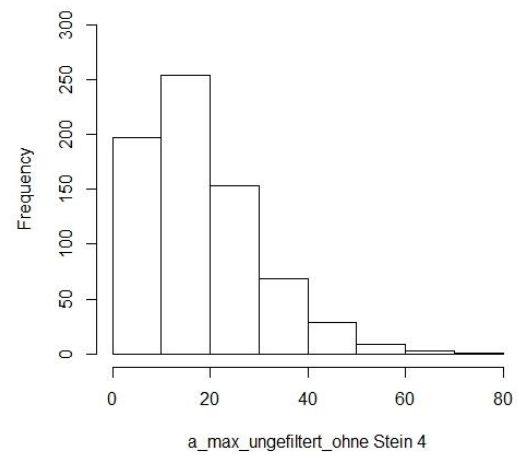
Stein 2 a_mean_ungefiltert ohne Ausreisser



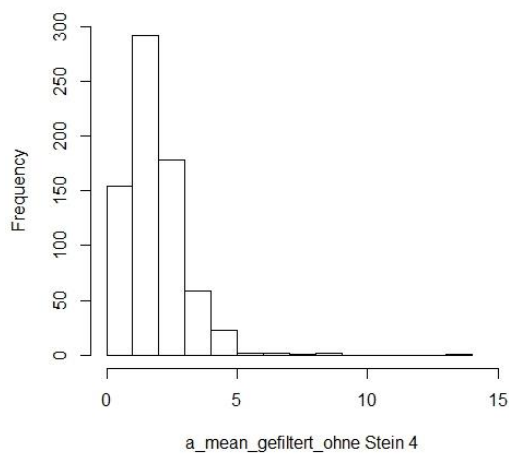
Stein 4 a_max_gefiltert ohne Ausreisser



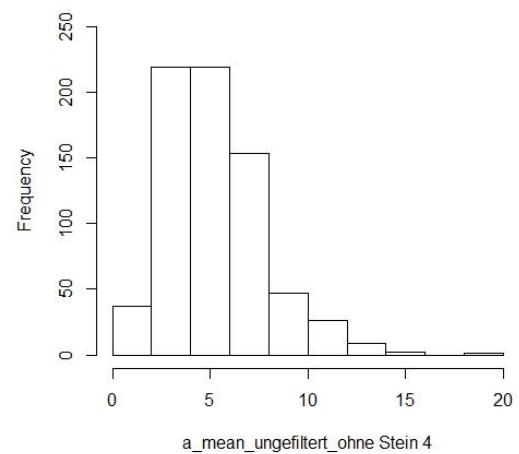
Stein 4 a_max_ungefiltert ohne Ausreisser



Stein 4 a_mean_gefiltert ohne Ausreisser



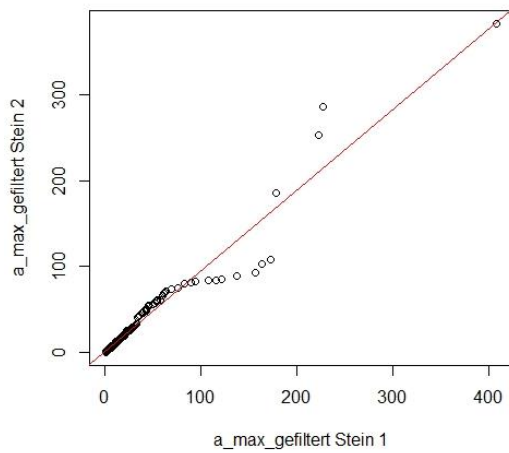
Stein 4 a_mean_ungefiltert ohne Ausreisser



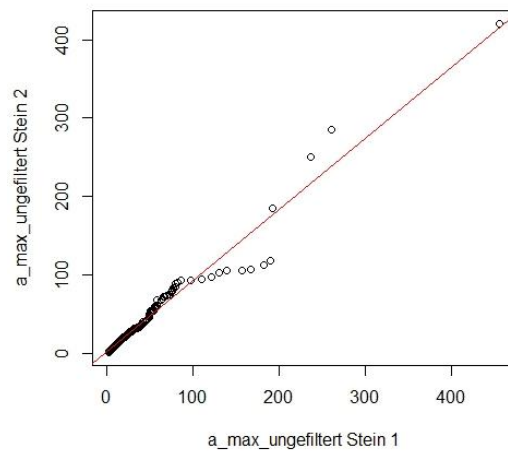
Anhang E

Diagramme des Kolmogorov-Smirnov-Tests (mit Ausreisser)

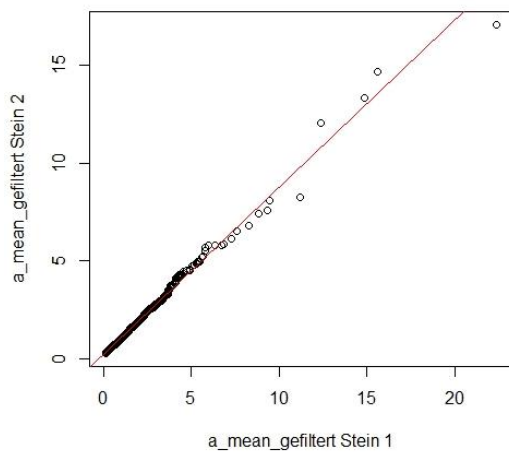
Kolmogorov-Smirnov-Test: Stein 1 / Stein 2



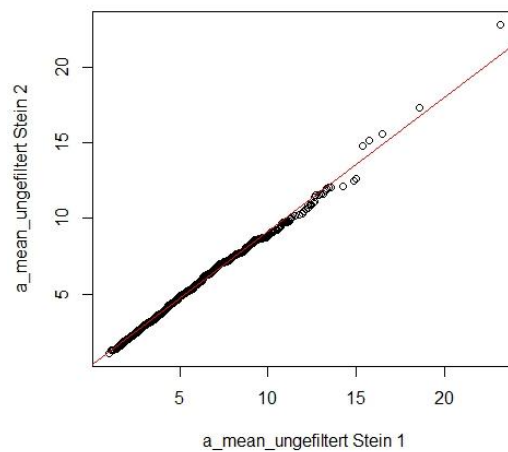
Kolmogorov-Smirnov-Test: Stein 1 / Stein 2



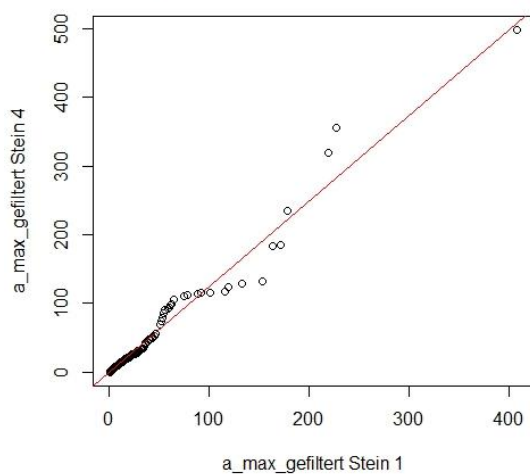
Kolmogorov-Smirnov-Test: Stein 1 / Stein 2



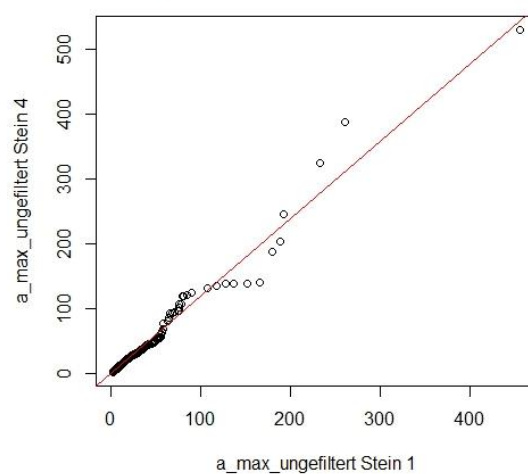
Kolmogorov-Smirnov-Test: Stein 1 / Stein 2



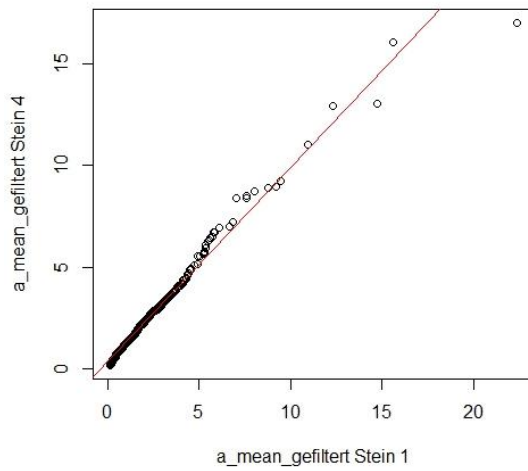
Kolmogorov-Smirnov-Test: Stein 1 / Stein 4



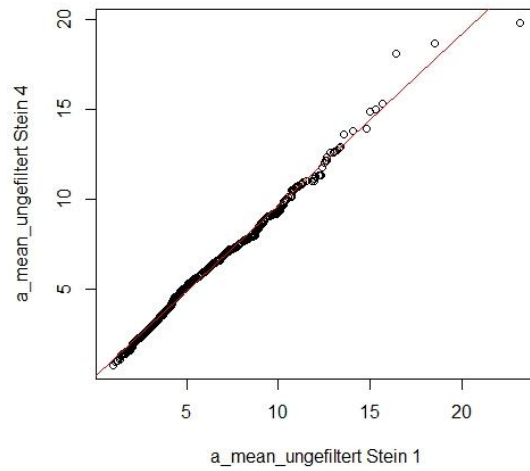
Kolmogorov-Smirnov-Test: Stein 1 / Stein 4



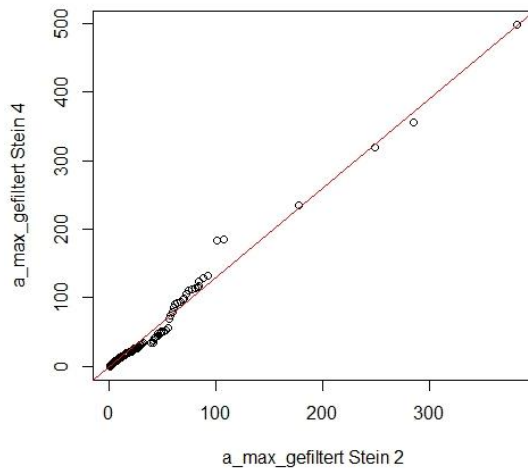
Kolmogorov-Smirnov-Test: Stein 1 / Stein 4



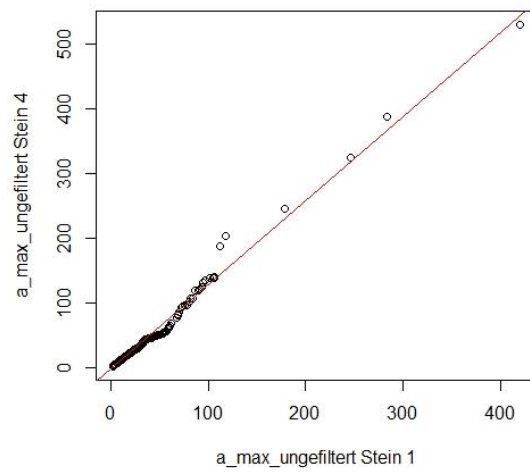
Kolmogorov-Smirnov-Test: Stein 1 / Stein 4



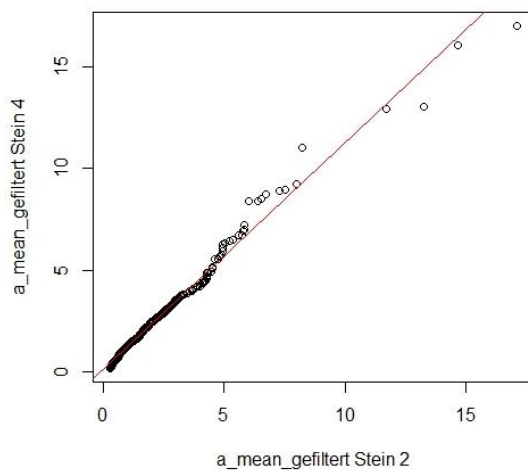
Kolmogorov-Smirnov-Test: Stein 2 / Stein 4



Kolmogorov-Smirnov-Test: Stein 2 / Stein 4



Kolmogorov-Smirnov-Test: Stein 2 / Stein 4



Kolmogorov-Smirnov-Test: Stein 2 / Stein 4

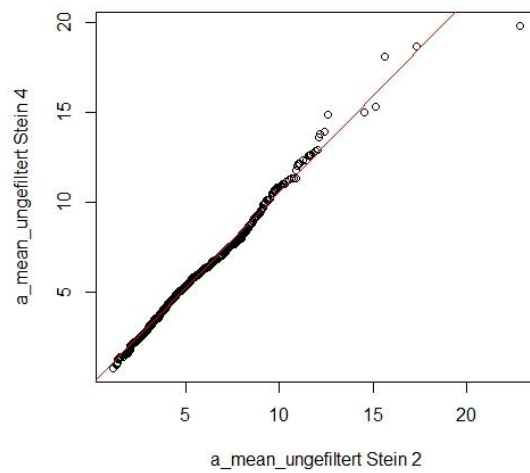
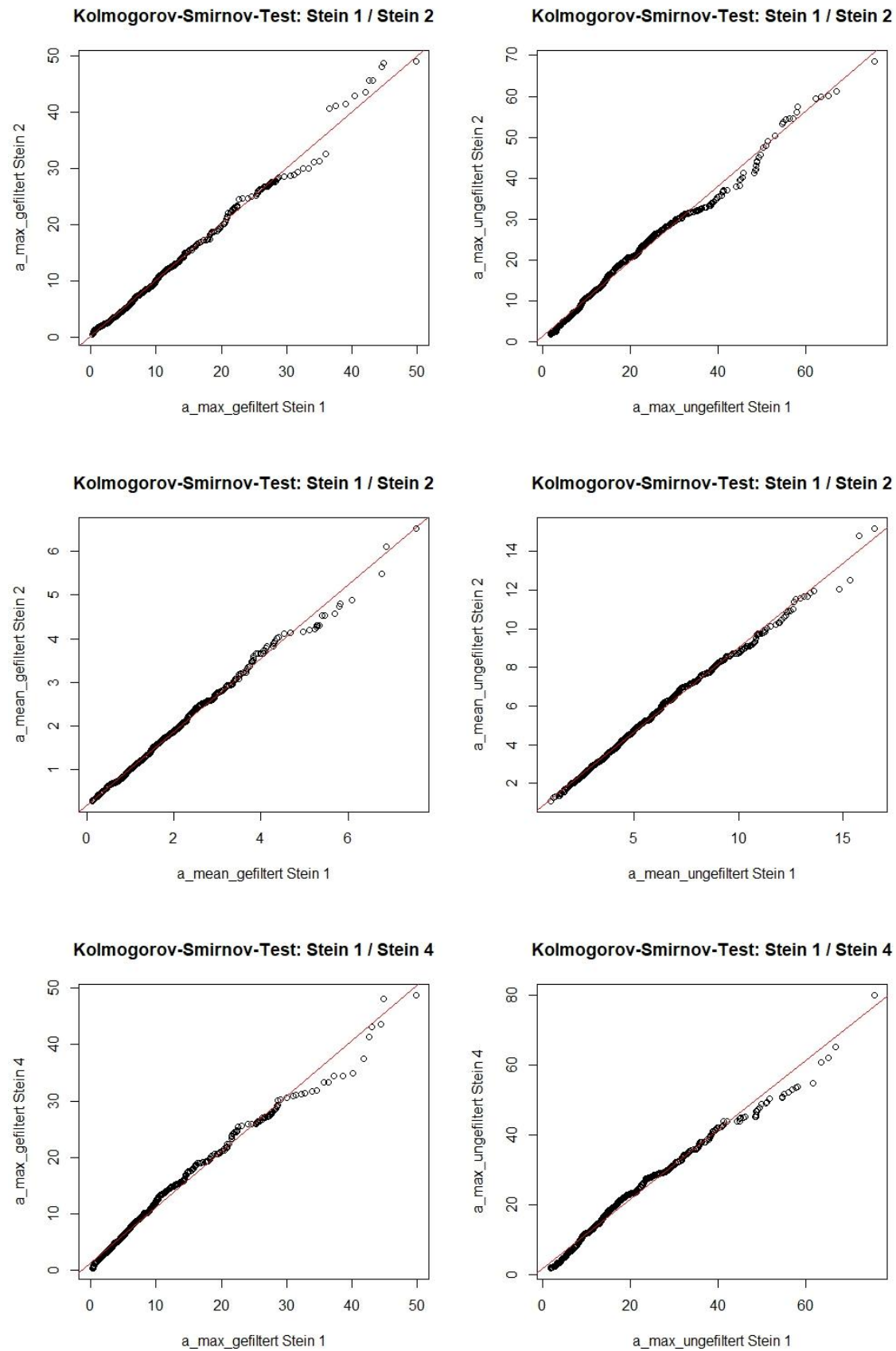
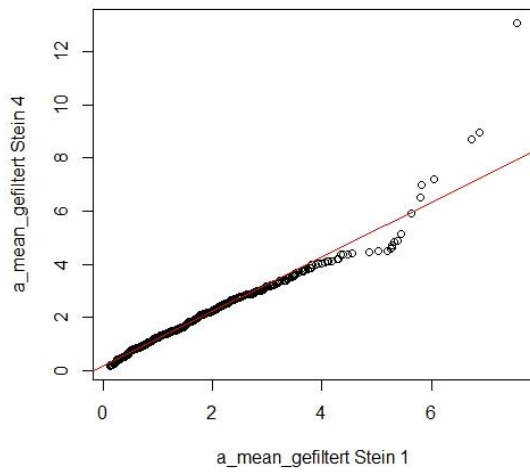


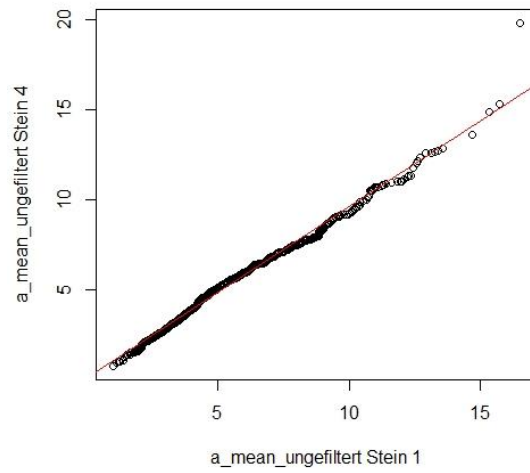
Diagramme des Kolmogorov-Smirnov-Tests (ohne Ausreisser)



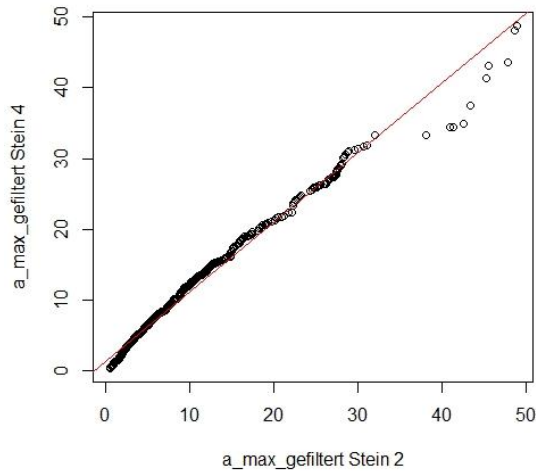
Kolmogorov-Smirnov-Test: Stein 1 / Stein 4



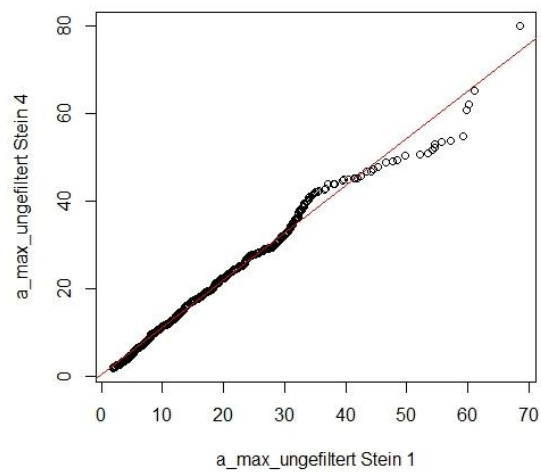
Kolmogorov-Smirnov-Test: Stein 1 / Stein 4



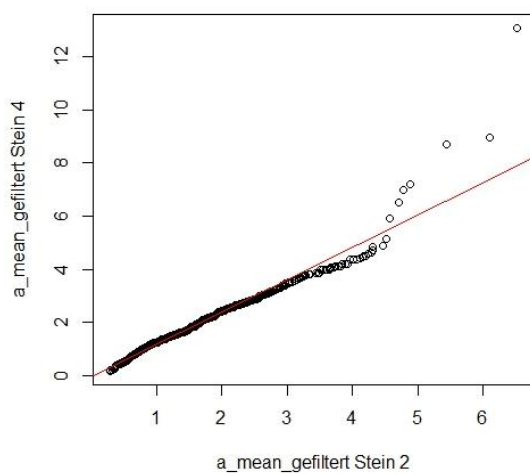
Kolmogorov-Smirnov-Test: Stein 2 / Stein 4



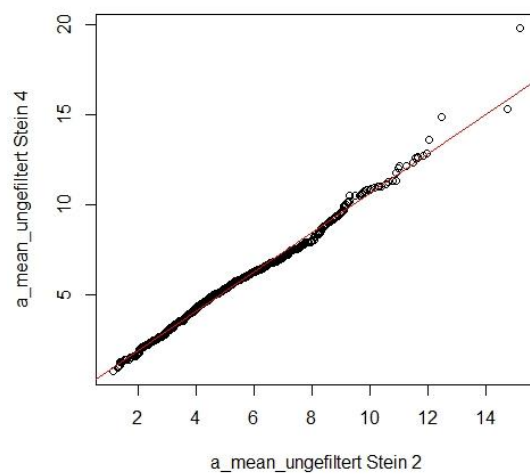
Kolmogorov-Smirnov-Test: Stein 2 / Stein 4



Kolmogorov-Smirnov-Test: Stein 2 / Stein 4

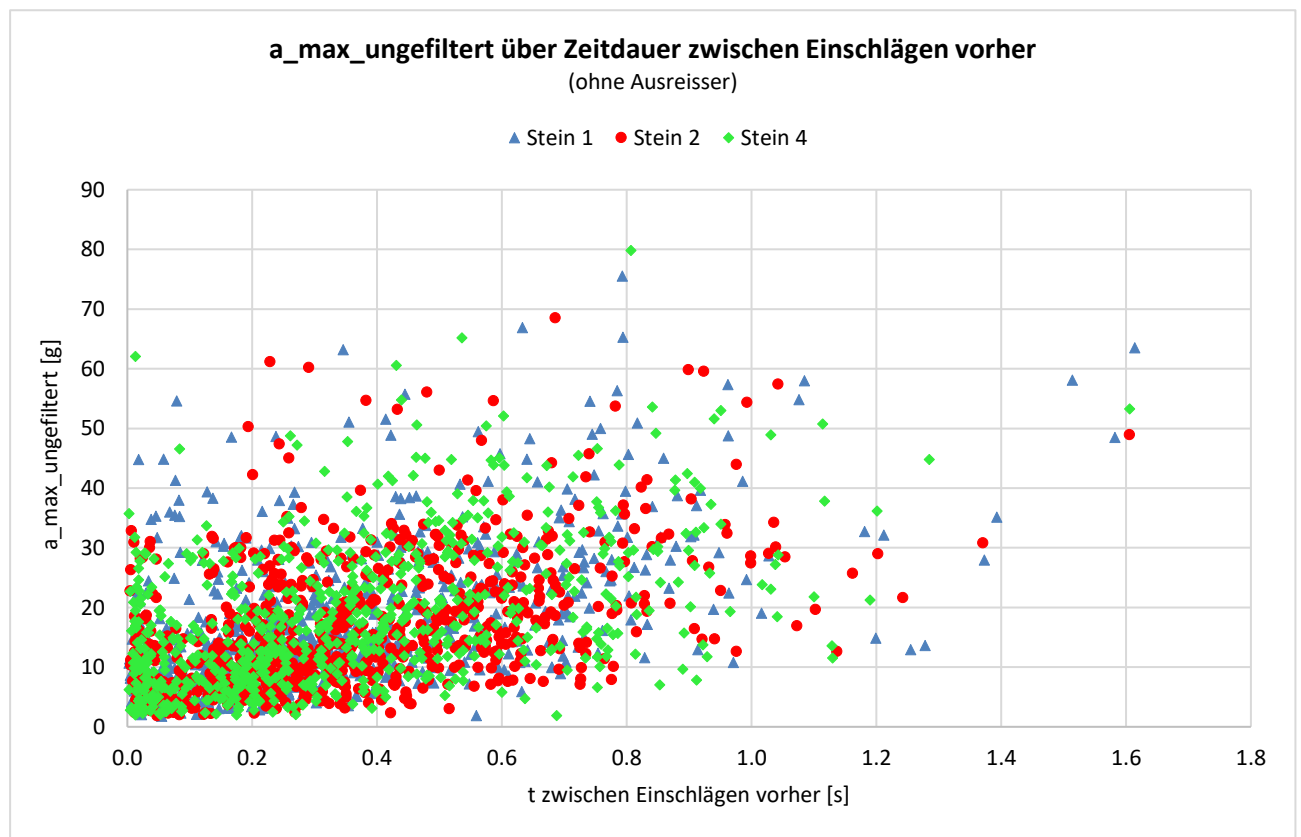
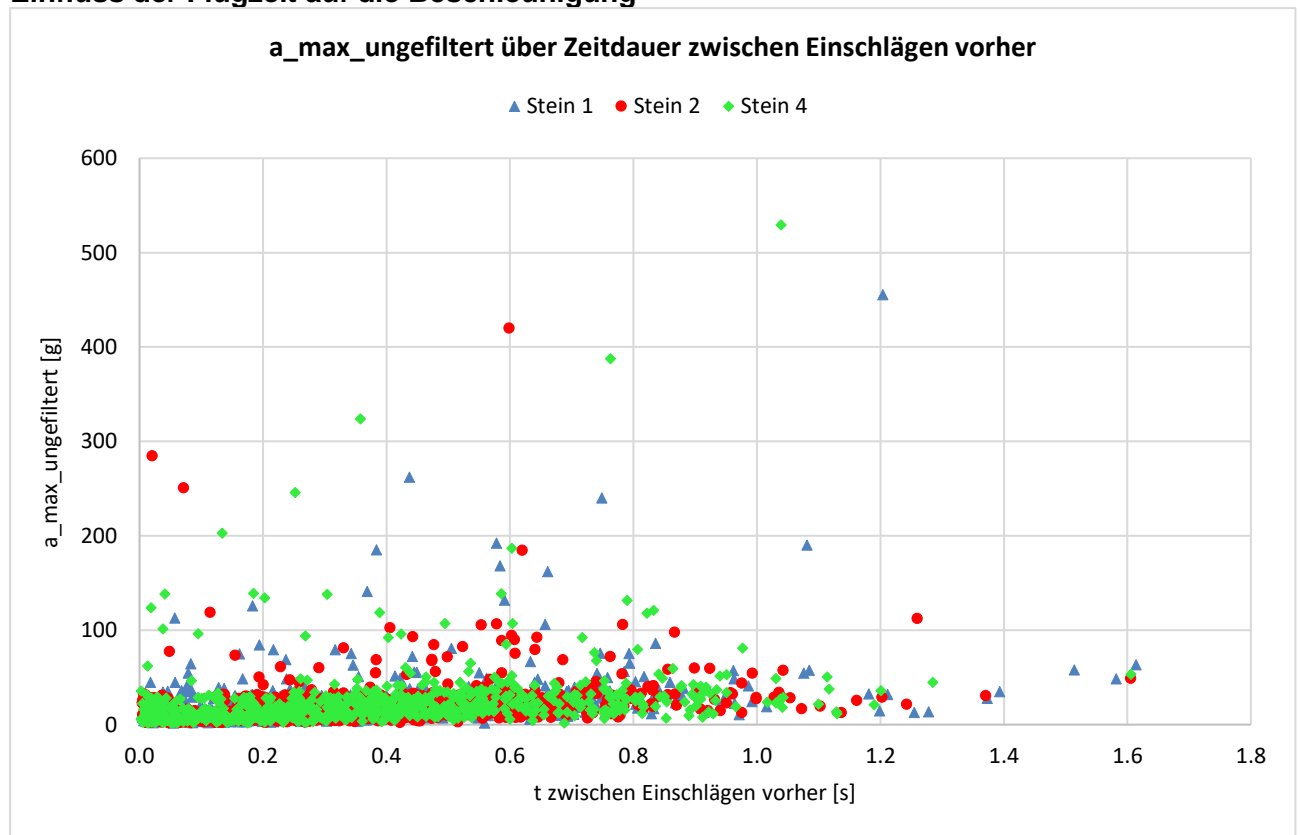


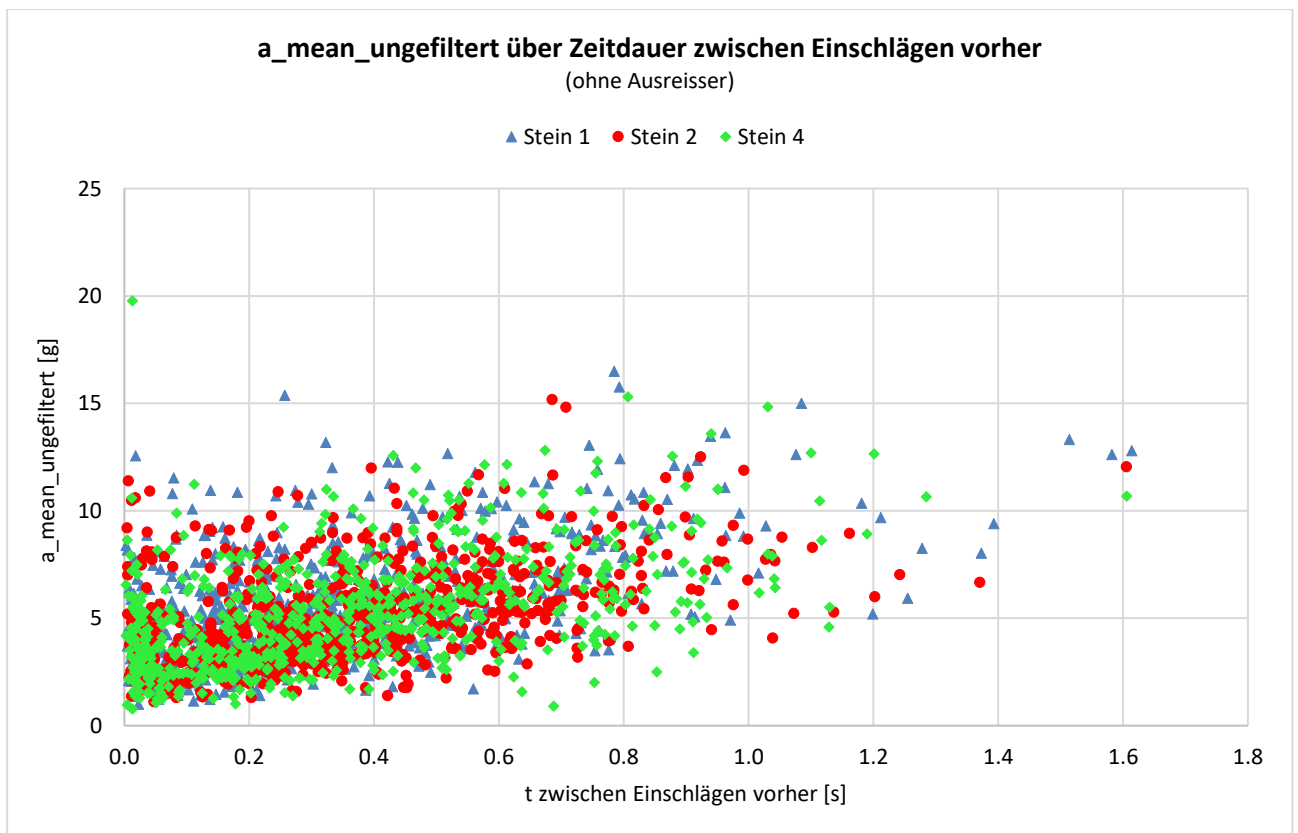
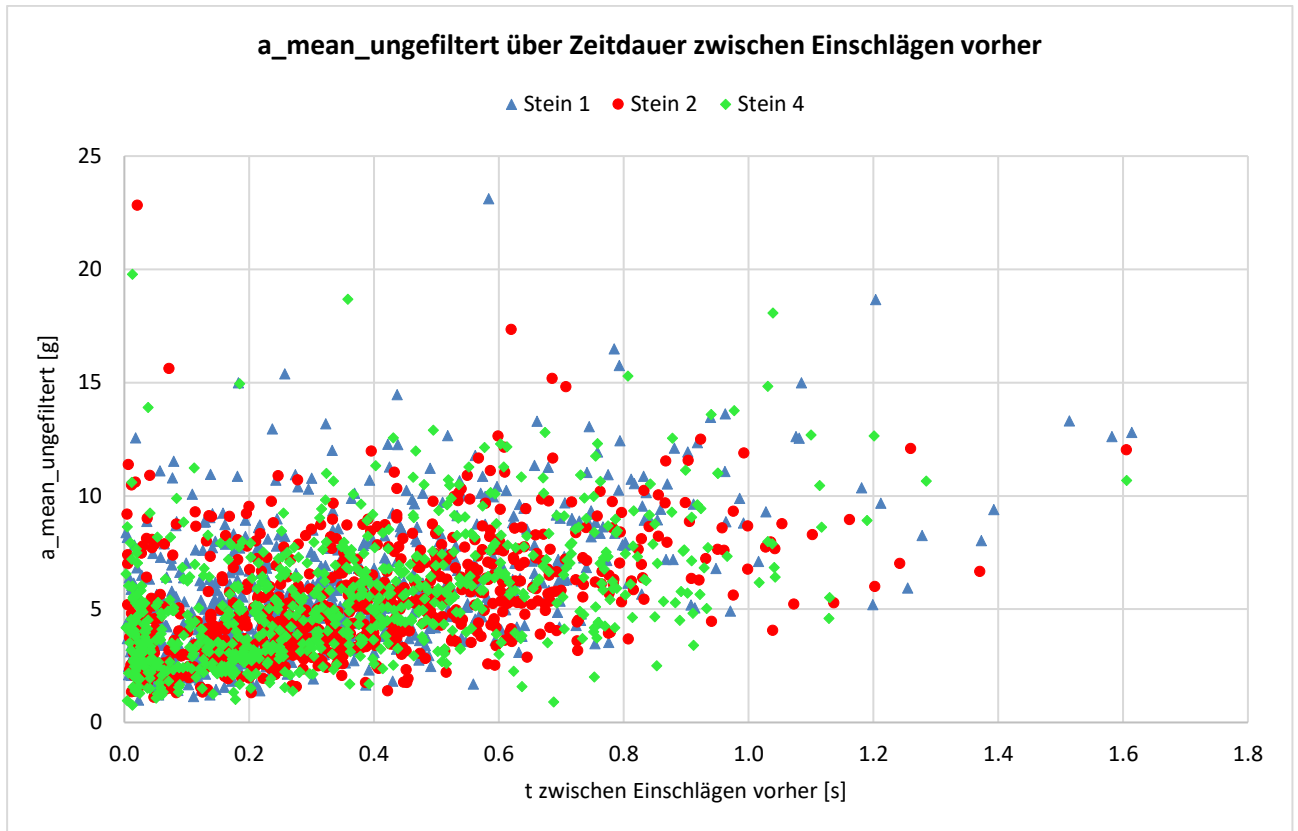
Kolmogorov-Smirnov-Test: Stein 2 / Stein 4



Anhang F

Einfluss der Flugzeit auf die Beschleunigung





Anhang G

Einfluss der Einschlagsdauer auf die Beschleunigung

